

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Análise de desempenho de um sistema de ventilação natural de uma creche

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Gonçalo Nunes Simões

Dissertação orientada por:
Professor Doutor Guilherme Carrilho da Graça
Doutor Nuno M. Mateus

Resumo

O tempo despendido pelo ser humano no interior de edifícios tem aumentado, bem como a necessidade de uma boa qualidade do ar interior (QAI). Os sistemas de ventilação mecânica têm sido a escolha prioritária para climatização, o que elevou drasticamente o consumo energético nos edifícios na última década. A ventilação natural é uma solução passiva, capaz de responder às necessidades de climatização e com baixos custos associados. Esta dissertação de mestrado apresenta um conjunto de medições de sistemas de ventilação natural por deslocamento vertical do ar (DV) em três escolas localizadas na zona urbana de Lisboa: duas creches e uma universidade. As salas onde decorreram os ensaios possuem diferentes sistemas de ventilação (com e sem chaminé). Os resultados experimentais foram utilizados para avaliar o desempenho dos sistemas de ventilação natural e validar a capacidade do *EnergyPlus* para simular sistemas DV, com um modelo de três-nós implementado no seu código. Os resultados da Creche Areeiro revelam que o aumento da altura da chaminé, de 1m para 4m, diminui a temperatura interior da sala. Os resultados obtidos demonstram também que o desempenho dos sistemas DV é influenciado pelo número de plumas térmicas, que ao aumentar, conduz à diminuição da temperatura interior. Por fim, um aumento da área da grelha de admissão leva a uma redução da temperatura interior. A validação dos resultados demonstra que o *EnergyPlus* tem a capacidade de prever a altura neutra, com um erro médio inferior a 12%. A ferramenta computacional analisada determinou também o gradiente vertical de temperatura com um erro médio de 4% (com um desvio médio de 0.7°C). Apesar da complexidade dos casos analisados, sem controlo das condições fronteira, a comparação entre os resultados medidos e simulados deve contribuir para um aumento de confiança do uso da ferramenta computacional *EnergyPlus*, de modo a simular sistemas de ventilação por deslocamento vertical de ar.

Palavras-Chave: ventilação natural, sistema de ventilação por deslocamento vertical de ar; validação de EnergyPlus.

Abstract

The time that people spend indoors is increasing, as well as the need for good indoor air quality. Therefore, mechanical ventilation systems have been the first choice for air conditioning, which dramatically increased the energy consumption in buildings in the last decade. Natural ventilation is a passive solution, capable of responding to the air conditionings needs and with low associated costs. This master's thesis presents a set of measurements of natural displacement ventilation (DV) systems driven by buoyancy in three schools located in the urban area of Lisbon: two kindergartens and a university. The rooms, where took place the measurements, have different ventilation systems (with and without thermal chimney). The experimental results are used to analyze the performance of the installed natural ventilation system and to validate the capabilities of EnergyPlus to simulate natural DV systems, with a three-node DV model implemented on the thermal building software code. The experimental results show that increasing the stack height, of 1m to 4m, lowers the inside air temperature. The obtain results also demonstrate that natural DV systems performance is affected by the number of thermal plumes, that increasing, leads to a lower inside air temperature. Lastly, increase the inflow grille opening area leads to a reduction of the indoor air temperature. The validation results reveal that EnergyPlus is able to predict neutral height with an average error below 12%. Also proved to be capable to predict the vertical air temperature, with an average error of 4% (0.7°C). Despite the complexity of the cases studied, without control of boundary conditions, the comparison between measured and simulated results should contribute to increase confidence of using EnergyPlus, to simulate natural DV driven by buoyancy.

Keywords: natural ventilation; displacement ventilation; thermal chimney; EnergyPlus.

Índice

Resumo.....	iii
Abstract	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas.....	vii
Agradecimentos.....	viii
Simbologia e Notações.....	ix
Capítulo 1 – Introdução.....	10
1.1. Estrutura e Objetivos.....	11
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	12
Capítulo 3 – Fundamentos Teóricos.....	14
3.1. Transferência de calor	14
3.2. Balanço térmico de Edifícios	16
3.3. Ventilação Natural.....	17
3.4. Simulação Térmica Dinâmica	21
3.4.1. EnergyPlus	21
3.5. Simulação Dinâmica de Fluídos.....	23
3.5.1. PHOENICS	23
Capítulo 4 – Casos de Estudo.....	25
4.1. Creche Areeiro	25
4.2. Universidade de Lisboa.....	27
4.3. Creche Telheiras.....	29
4.4. Determinação da Emissividade dos Cilindros.....	30
4.5. Monitorização dos Edifícios.....	31
4.6. Configurações das Medições.....	33
Capítulo 5 – Resultados Experimentais	34
5.1. Creche Areeiro	34
5.2. Creche Telheiras.....	36
Capítulo 6 – Simulação Dinâmica - EnergyPlus.....	38
6.1. Modelo DV de três-nós	40
6.2. Determinação do Coeficiente de descarga	42
Capítulo 7 – Validação dos Resultados.....	45
7.1 Análise do Impacto do Coeficiente de Descarga.....	48
Capítulo 8 – Conclusões.....	49
Referências Bibliográficas	51

Índice de Figuras

Figura 1: Mecanismos de transferência de calor – Adaptado de Incropera (2011) [35]	14
Figura 2: Balanço térmico de um edifício - Adaptado de Mateus (2012) [56]	16
Figura 3: Esquema do arrefecimento noturno – Adaptado de AUTODESK SUSTAINABILITY WORKSHOP [].....	18
Figura 4: Esquema de ventilação natural – Adaptado de Linden (1999) [54].....	19
Figura 5: Etapas de simulação em EnergyPlus - Adaptado de Mateus (2012) []	23
Figura 6: Vista interior, exterior configuração do sistema de medição da creche do Areeiro	25
Figura 7: Esquema das medições efetuadas na Creche Areeiro	27
Figura 8: Vista aérea e interior da sala de aula da Universidade de Lisboa.....	28
Figura 9: Esquema das medições efetuadas na Universidade de Lisboa.....	29
Figura 10: Vista do pátio, interior e grelha de admissão da creche Telheiras	29
Figura 11: Impacto do A^* na temperatura interior e na altura neutra	34
Figura 12: Impacto do número de plumas na temperatura interior e na altura neutra.....	35
Figura 13: Impacto da altura da chaminé na temperatura interior.....	35
Figura 14: Resultados de duas semanas de medição na creche Telheiras	36
Figura 15: Resultados de um mês de medição na creche Telheiras	37
Figura 16: Zona térmica e respetivo modelo geométrico da Creche Areeiro.....	38
Figura 17: Zona térmica e respetivo modelo geométrico da Universidade de Lisboa.	39
Figura 18: Modelo DV de três-nós.....	40
Figura 19: Difusor – geometria e resultados CFD	42
Figura 20: Chaminé - geometria e resultados.....	43
Figura 21: Resultados da altura neutra e da taxa de renovação de ar: comparação entre medido e simulado	46
Figura 22: Resultados e comparação da temperatura nos três nós	47

Índice de Tabelas

Tabela 1: Referências associadas à validação de modelos de ventilação natural.....	13
Tabela 2: Propriedades dos materiais construtivos da Creche Areeiro	26
Tabela 3: Propriedades dos materiais construtivos da Universidade de Lisboa.....	28
Tabela 4: Especificações dos instrumentos de medição utilizados	32
Tabela 5: Casos CA e UL.....	33
Tabela 6: Análise da <i>grid</i> para determinação do coeficiente de descarga.....	44
Tabela 7: Comparação entre caudal medido e simulado	45
Tabela 8: Comparação entre altura neutra medida e simulada.....	46
Tabela 9: Comparação entre nós de temperatura medidos e simulados	47
Tabela 10: Análise do impacto do coeficiente de descarga no modelo DV de três-nós.....	48

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais, Paula e João, e ao meu irmão, Ricardo. Estiveram presentes em toda a minha vida e são uma inspiração diária.

À minha restante família pela presença constante durante todo o percurso académico.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Guilherme Carrilho da Graça, por toda a sabedoria e conhecimento transmitidos, pelas opiniões e críticas e, sobretudo, pela sua disponibilidade e colaboração para solucionar problemas e questões que surgiram ao longo desta dissertação.

Ao meu coorientador, Nuno Mateus, por todo o apoio e motivação ao longo deste trabalho. Sem dúvida, uma enorme ajuda. Um grande obrigado!

Aos meus amigos Inês Santos, Marta Chaves, Rafael Barreira, Carina Ferreira, Joana Raquel e João Pedro por todo o acompanhamento durante todos estes anos, não só a nível académico, mas sobretudo a nível pessoal.

Agradeço aos meus amigos de faculdade, André Caldeira, Francisco Pereira e Filipe Fonseca com quem partilhei momentos inesquecíveis nestes cinco anos. Queria também deixar um agradecimento especial à Sara Marcelo, Patrícia Manteiga, Vera Reis e Susana Rodrigues.

Agradeço à Filipa Silva, Daniel Albuquerque, João Francisco e Cristiano Lúcio pela amizade e companheirismo durante estes meses.

Um obrigado à Ana Rita Martins por todos os conselhos, enorme compreensão e especialmente pela presença nos momentos mais marcantes.

Simbologia e Notações

SS	Single Sided
CV	Ventilação cruzada
DV	Ventilação natural por deslocamento vertical de ar
DSF	Fachada de dupla pele
CFD	Computação dinâmica de fluidos
QAI	Qualidade do ar interior
NZEB	Nearly Zero Energy Buildings
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado

Capítulo 1 – Introdução

Atualmente, o setor dos edifícios é responsável por cerca de 40% da energia primária consumida na Europa [1] e nos Estados Unidos da América [2]. As previsões indicam que estes valores continuem a aumentar [3]. Estes dados, aliados ao facto de as pessoas despendem mais de 90% do seu tempo em ambientes interiores [4], conduzem a um aumento significativo da energia consumida (cerca de 50%), associada a sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC). [5]. Neste contexto, os sistemas de ventilação natural podem ser uma ferramenta essencial para limitar o consumo energético e atingir as metas dos *Nearly Zero Energy Buildings* (NZEB) [6].

A ventilação natural, além de ter a capacidade de reduzir as necessidades de climatização, promove uma melhor qualidade do ar interior (QAI) [7]. Geralmente, a QAI é negligenciada e os baixos níveis de ventilação resultam em níveis altos de concentração de poluentes [8]. As crianças têm maior suscetibilidade a vários poluentes, quando comparadas a adultos, dado que estas respiram maiores quantidades de ar relativamente ao seu peso corporal [9][10].

As salas de aula são o local onde as crianças despendem mais tempo [11] e muitas vezes possuem má qualidade de ar interior devido à insuficiente renovação de ar [12,13]. Vários estudos associam este facto à redução das capacidades de aprendizagem dos alunos [14,15]. Para lidar com este problema, várias entidades (ASHRAE e CEN) recomendam um caudal mínimo de ar novo de 7-8l/s por ocupante [16,66] e uma média de concentração de CO₂ inferior a 1625ppm durante as últimas oito horas [58]. Para alcançar caudais de ventilação desta magnitude com sistemas de ventilação mecânica, a energia consumida irá aumentar e várias instituições escolares possuem um orçamento limitado. Portanto, os sistemas de ventilação natural são uma boa alternativa e não têm custos associados. No entanto, dimensionar estes sistemas em escolas é uma tarefa difícil devido ao uso intenso dos espaços e à dependência do clima.

O desempenho de sistemas de ventilação natural em escolas pode ser avaliado através de simulações térmicas, medições ou questionários. Em 2004, um inquérito realizado em duas escolas [17] conclui que, ao utilizar ventilação natural, os ocupantes têm maior tolerância a temperaturas interiores mais elevadas. Um estudo recente confirmou também que os alunos podem ter um bom desempenho escolar independentemente do sistema de ventilação instalado [18]. Em 2008, um grande estudo de CO₂, analisou 62 salas de aula [19] e mostrou que, grande parte do tempo, as renovações de ar novo eram inferiores aos valores mínimos recomendados. Como esperado, em sistemas de ventilação natural, a concentração de CO₂ é maior quando as janelas estão fechadas. Esta situação foi também verificada por outros autores [20], sobretudo no Inverno, quando a temperatura exterior não permite abrir as janelas devido ao desconforto térmico. É então consensual que a abertura das janelas está mais relacionada com a temperatura do que com os problemas de qualidade de ar interior [21].

Grande parte das escolas estão localizadas em centros urbanos, devido à maior concentração da população nas cidades. Como tal, utilizar sistemas de ventilação natural através do vento é uma tarefa difícil derivado das baixas velocidades do vento que caracterizam estes locais. Por conseguinte, os projetistas dimensionam estes sistemas utilizando uma diferença de temperatura entre o interior e o exterior de pelo menos 2-3°C. Este requisito não recomenda a utilização destes sistemas com temperaturas exteriores acima de 25°C. Para aumentar a diferença de temperatura

pode recorrer-se à instalação de chaminés, que aumentam a distância entre a entrada e a saída do ar e, naturalmente, diminuem a temperatura interior [54,22].

1.1. Estrutura e Objetivos

Esta dissertação de mestrado apresenta um conjunto de procedimentos e de resultados obtidos de dois sistemas de ventilação natural por deslocamento vertical de ar (DV). As medições ocorreram em três escolas distintas e foi feita a simulação térmica correspondente (apenas em duas escolas). Desta forma, esta tese tem como principais objetivos:

- Analisar a capacidade do *EnergyPlus* para simular sistemas DV, com o modelo DV de três-nós [23] implementado no seu código;
- Avaliar o desempenho de dois sistemas de ventilação natural por deslocamento vertical de ar, determinando os parâmetros relevantes que definem este sistema.

O presente documento encontra-se estruturado do seguinte modo:

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica do trabalho existente, onde se apresenta um levantamento dos estudos de validação de modelos de ventilação natural, as ferramentas utilizadas e os erros associados.

No capítulo 3 introduzem-se os fundamentos teóricos e os conceitos necessários à compreensão do tema estudado. É feita uma descrição do comportamento térmico de edifícios e são apresentados os principais mecanismos de ventilação natural, dando ênfase à ventilação por deslocamento vertical de ar. São ainda apresentados os *softwares* de simulação utilizados ao longo deste trabalho.

No capítulo 4 são apresentados os casos de estudo, nomeadamente as salas onde se efetuaram os ensaios práticos. Na secção 4.4 é descrito o procedimento experimental para determinação da emissividade de simuladores utilizados nos ensaios. Nas secções 4.5 e 4.6 são descritos os procedimentos utilizados e ainda as configurações de medição.

No capítulo 5 mostram-se os resultados experimentais e a sua discussão.

No capítulo 6 são descritas as simulações térmicas. Na secção 6.1 é apresentado o modelo DV de três-nós introduzido na ferramenta de simulação. A determinação do coeficiente de descarga está descrita na secção 6.2.

No capítulo 7 é feita a comparação entre os resultados medidos e os simulados, com o objetivo de validar o *EnergyPlus*. Na secção 7.1 é feita uma análise da influência do coeficiente de descarga nos resultados, comparando valores tabelados com valores obtidos na simulação.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

A validação de modelos de ventilação natural requer múltiplos instrumentos de medição e diversos sensores para monitorizar fatores como a temperatura, os ganhos internos, a concentração de CO₂ e a velocidade do ar. Em muitos casos, a necessidade de controlar as condições fronteira leva ao uso de células teste com envolvente adiabática. Os sistemas de ventilação natural dependem em grande parte das condições fronteira e das condições atmosféricas exteriores, o que requer, em muitos casos, ensaios em edifícios reais. Infelizmente, medições detalhadas em edifícios reais são raras porque a dificuldade de controlar e medir as condições fronteira é elevada. Como resultado, existe um número limitado de estudos de validação de sistemas de ventilação natural.

A Tabela 1 apresenta um sumário de vários estudos de validação de sistemas de ventilação natural. Diversos estudos incidem em fachadas de dupla pele (DSF). A complexidade desta solução faz com que o uso de simulações de computação da dinâmica de fluidos (CFD) seja uma abordagem recorrente. Nos estudos de validação de CFD baseados em células teste expostas às condições meteorológicas [25,27], o calor transferido pela envolvente tem um impacto significativo nos resultados. Para melhorar os resultados é importante utilizar a função *low-Reynolds* [24], que implica um dispêndio excessivo de tempo nas simulações. Para além disso, avaliar o impacto de DSF no consumo energético de edifícios requer um ano inteiro de simulações, o que muitas vezes apenas pode ser feito num curto período de tempo. Para isso recorre-se a ferramentas de simulação térmica. Os estudos de validação de fachadas de dupla pele que utilizam *EnergyPlus* concluem que a qualidade dos dados meteorológicos inseridos no programa e as incertezas relacionadas com a modelação do caudal são as potenciais causas das discrepâncias entre resultados medidos e simulados [31,32].

Os estudos de validação baseados em mecanismos de ventilação natural induzidos pelo vento [26,29,30] tendem a mostrar maiores variações entre os resultados obtidos e os simulados. Parte destas diferenças podem ser atribuídas à dificuldade em medir os parâmetros do vento no local. Nos sistemas de ventilação cruzada este impacto é maior [34]. Idealmente, os sensores de velocidade e direção do vento deviam ser instalados o mais perto possível do edifício.

Para os casos apresentados na Tabela 1, a abordagem mais comum é a utilização de modelos nodais baseada no *software* de simulação térmica *EnergyPlus*. Os erros máximos das simulações CFD são comparáveis com as restantes aproximações. Uma maior complexidade da simulação CFD não se traduz em erros menores de simulação, mas permite fazer uma análise mais detalhada. No geral, os resultados apresentados na Tabela 1 revelam um rigor aceitável para simulações: o erro médio de todos os modelos avaliados é de 1.2°C, que varia entre 0.3°C e 2.9°C, enquanto que a média para o erro máximo é de 6.6°C. Vários casos presentes na Tabela 1 revelam dificuldade em conhecer o uso das portas e janelas, o que leva a resultados inconclusivos.

Tabela 1: Referências associadas à validação de modelos de ventilação natural

Referência	Tipo de edifício	Mecanismos de ventilação	Configuração do sistema	Ferramenta de simulação	Erro (°C)	
					Médio	Erro máximo
<i>Z. Zeng, et al. [25]</i>	Célula teste	Efeito térmico e vento	DSF	CFD	-	2.0
<i>Y. Wang, et al. [26]</i>	Sala aula	Efeito térmico e vento	DV	CFD	-	1.2
<i>I. Khalifa, et al. [27]</i>	Célula teste	Efeito térmico e vento	DSF	TRNSYS&CONTAM (nodal+CFD)	-	3.0
<i>F.R. Mazarrón, et al. [28]</i>	Adega	Efeito térmico	Chaminé	EnergyPlus (nodal)	0.3	-
<i>Z. Zhai, et al. [29]</i>	Escritório	Efeito térmico e vento	Chaminé	EnergyPlus (nodal)	-	3.3
<i>Taleghani, et al. [30]</i>	Apartamento	Efeito térmico e vento	SS	EnergyPlus (nodal)	0.9	1.1
<i>Mateus, et al. [31]</i>	Célula teste	Efeito térmico	DSF	EnergyPlus (nodal)	1.4	2.5
<i>D. Kim, et al. [32]</i>	Célula teste	Efeito térmico e vento	DSF	EnergyPlus (nodal)	2.9	21.9
<i>C. J. Koinakis, et al. [33]</i>	Apartamento	Efeito térmico e vento	SS & CV	Custom (nodal)	0.5	1.0
<i>E.H. Mathews, et al. [34]</i>	Estábulo	Efeito térmico e vento	CV	Custom (electrical analogy)	-	1.2
Média					1.2	6.6

Capítulo 3 – Fundamentos Teóricos

Neste capítulo são introduzidos os conceitos teóricos necessários à compreensão desta dissertação. Vão ser apresentados fundamentos de transferência de calor em edifícios, bem como o seu comportamento térmico. Também vão ser discutidos conceitos de ventilação natural e por fim vai ser feita uma caracterização das ferramentas computacionais utilizadas.

3.1. Transferência de calor

A transferência de calor é um dos principais fatores do balanço térmico de um edifício e é fundamental compreender este princípio físico. O fenómeno de transferência de calor ocorre sempre que existe diferença de temperatura entre dois elementos [35]. Esta dá-se no sentido do meio mais quente para o mais frio. Quando os dois corpos se encontram à mesma temperatura atinge-se o equilíbrio térmico. Existem três processos diferentes de transferência de calor (Figura 1), sendo eles: condução, convecção e radiação.

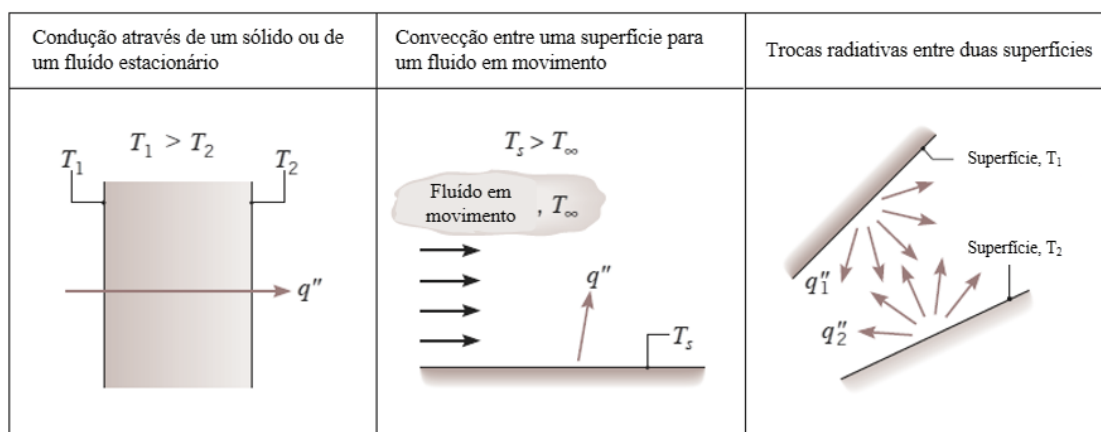


Figura 1: Mecanismos de transferência de calor – Adaptado de Incropera (2011) [35]

A transferência de calor por condução dá-se através da transferência de energia cinética a nível molecular em sólidos, líquidos e gases. Nos líquidos e nos sólidos não condutores elétricos, a condução ocorre devido às oscilações longitudinais da estrutura. Nos metais, a condução dá-se devido ao movimento de translação de eletrões livres. Por fim, a transferência de calor por condução nos gases efetua-se devido à colisão elástica das moléculas.

O fluxo de calor transferido por condução é dado pela lei de Fourier:

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde:

q''_x – Fluxo de calor por condução [W/m²]

k – Condutividade térmica do material [W/m.K]

$\frac{dT}{dx}$ – Gradiente de temperatura [K/m]

O mecanismo de transferência de calor por convecção tem como base a transferência de energia por condução molecular e por movimentação de sólidos, fluidos e gases. Este processo ocorre na transmissão de calor entre um objeto e o ar adjacente ou entre dois meios com diferentes temperaturas. Este mecanismo é proporcional à velocidade de movimentação do fluido e pode-se distinguir entre: convecção natural, onde o movimento do fluido é gerado pelas diferenças de pressão e diferenças de temperatura; e convecção forçada, quando o movimento do fluido é causado por fontes externas.

O fluxo de calor por convecção é dado pela seguinte equação:

$$q''_{\text{conv}} = h_c (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Onde:

q''_{conv} – Fluxo de calor por convecção [W/m²]

h_c – Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m²K]

T_s – Temperatura da superfície [K]

T_∞ – Temperatura do fluido exterior à camada limite [K]

Por fim, a transferência de calor por radiação consiste na emissão de fótons por um corpo com temperatura superior ao zero absoluto (0K). Este mecanismo de transmissão de calor dá-se quando existe uma superfície e um meio com diferentes temperaturas e ocorre devido à vibração das moléculas, emitindo radiação através do espaço.

O calor emitido por um corpo varia consoante a sua emissividade e é expresso pela seguinte equação:

$$q_{\text{rad}} = A_s \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (3)$$

Onde:

A_s – Área da superfície do corpo 1 [m²]

ε – Emissividade do corpo

σ – Constante de Stefan-Boltzmann, 5.67×10^{-8} [W/m².K]

T_s – Temperatura do corpo [K]

Sendo a troca de radiação entre dois corpos expressa por:

$$q_{\text{rad}} = A_s h_r (T_1 - T_{\text{sur}}) \quad (4)$$

Onde:

h_r – Coeficiente de transferência de calor por radiação [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

T_1 – Temperatura do corpo 1 [K]

T_{sur} – Temperatura ambiente [K]

3.2. Balanço térmico de Edifícios

Depois de apresentados os vários mecanismos de transferência de calor, é agora necessário compreender a sua influência e a forma como atuam no comportamento térmico dos edifícios. O balanço térmico de um edifício conta ainda com algumas variáveis adicionais:

- Ganhos internos, resultantes da iluminação utilizada nos diferentes compartimentos, dos equipamentos elétricos e da atividade dos ocupantes;
- Ganhos solares, consequentes da incidência, direta e indireta, de radiação solar na envolvente exterior do edifício;
- Ganhos de climatização representam a energia despendida para aquecimento ou arrefecimento do ar interior;
- Ganhos de ventilação, resultantes da ventilação e/ou infiltração do ar exterior;
- Perdas pela envolvente, que engloba todas as perdas térmicas através de paredes, janelas, cobertura etc.

Este balanço energético está representado na Figura 2.

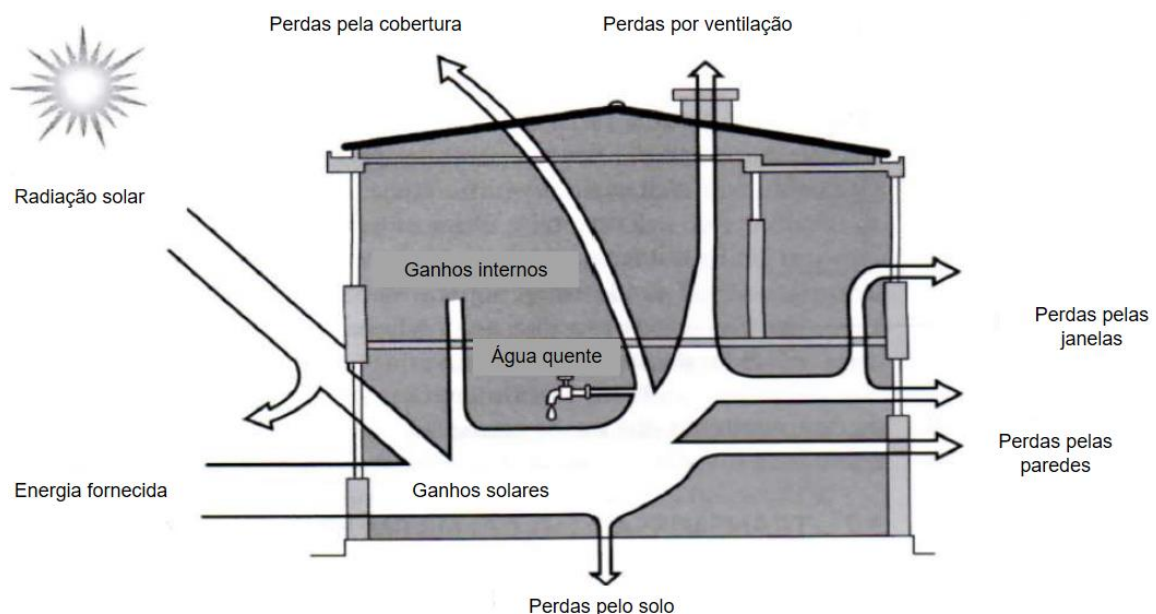


Figura 2: Balanço térmico de um edifício - Adaptado de Mateus (2012) [56]

Logo, o balanço térmico pode ser descrito pela equação 5:

$$G_i + G_s + G_v + G_c = \rho c_p V_s \frac{\Delta T}{\delta t} + \sum_{n=1}^k (T_i - T_e) A_n U_n \quad (5)$$

Onde:

G_i – Ganhos internos [W]

$G_s = A_v F_s (R_{dir} \cos(AT) \cos(AZ) + F_{f_j-c} R_{dif}) C_c$ – Ganhos solares [W]

$G_v = \rho c_p \dot{V} (T_{ext} - T_{int})$ – Ganhos de ventilação [W]

$G_c = \rho c_p \dot{V} (T_{ins} - T_{int})$ – Ganhos de climatização [W]

$\rho c_p V_s \frac{\Delta T}{\delta t}$ – Energia armazenada no ar interior [W]

$\sum_{n=1}^k (T_i - T_e) A_n U_n$ – Perdas através da envolvente [W]

E:

ρ – Densidade [kg/m³]

c_p – Calor específico [J/Kg.K]

V_s – Volume [m³]

$\frac{\Delta T}{\delta t}$ – Variação da temperatura no tempo [K/s]

T_i – Temperatura interior [°C]

T_e – Temperatura exterior [°C]

A_n – Área da superfície n [m²]

U_n – Coeficiente de transmissão térmica da superfície n [W/m².K]

A_v – Área do vão envidraçado [m²]

F_s – Factor solar

R_{dir} – Radiação direta

AT – Altura solar

AZ – Azimute solar

F_{f_j-c} – Fator solar entre céu e vão envidraçado

R_{dif} – Radiação difusa

C_c – Fator de transferência de calor sensível

\dot{V} – Caudal do fluido [m³/s]

T_{ins} – Temperatura de insuflação do ar [°C]

3.3. Ventilação Natural

A ventilação natural é o processo de renovação de ar recorrendo apenas a meios naturais (janelas, chaminés térmicas, grelhas de admissão de ar, etc), ou seja, sem utilizar sistemas mecânicos.

Este tipo de ventilação tem origem no efeito do vento, no efeito térmico ou numa combinação dos dois mecanismos. No primeiro caso, o efeito do vento nos edifícios é influenciado pela forma do mesmo e pela proximidade de outros edifícios, ou seja, o vento cria diferentes pressões, dependendo do seu local de incidência. Por outro lado, o efeito térmico tem origem na diferença de temperaturas entre o ar interior e o ar exterior, ou entre dois espaços no interior do edifício, o que

se traduz numa diferença de densidades do ar. Portanto, o ar mais frio tende a entrar no edifício pelos níveis inferiores, enquanto o ar quente, menos denso, tende a subir e a ser extraído pelos níveis mais elevados.

Uma das grandes funcionalidades da ventilação natural é o arrefecimento noturno. Este fenómeno utiliza as baixas temperaturas noturnas e a fraca ocupação do edifício durante este período para reduzir a temperatura do ar interior [36]. Este mecanismo passivo de ventilação tem assim como objetivos remover o excesso de calor e poluentes e reduzir a temperatura durante o início do período de ocupação (Figura 3). O arrefecimento noturno, aliado a uma boa inércia térmica, reduz também as temperaturas de pico durante as horas mais quentes do dia [37]. Este sistema, em termos arquitetónicos, não tem nenhum impacto visível no *design* e na fachada do edifício [38].

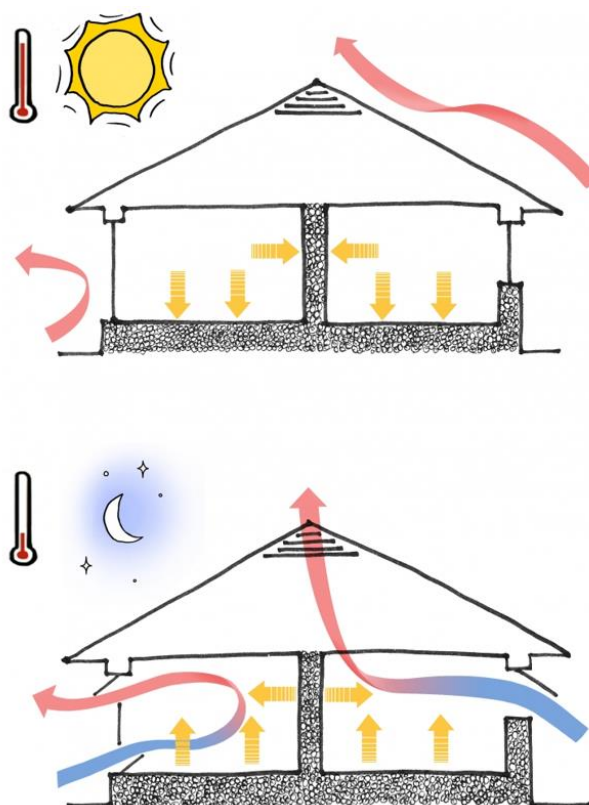


Figura 3: Esquema do arrefecimento noturno – Adaptado de AUTODESK SUSTAINABILITY WORKSHOP [39]

Existem essencialmente três sistemas de ventilação natural: *single-sided* (SS), ventilação cruzada (CV) e ventilação natural por deslocamento vertical de ar (DV). SS e CV são mecanismos que utilizam maioritariamente a pressão do vento e a forma do edifício para introduzir ar novo através de uma ou várias aberturas na fachada. SS é o mecanismo de ventilação natural mais comum e mais fácil de implementar nos edifícios, pois utiliza apenas aberturas numa fachada, e é ainda afetada pelo efeito térmico que pode promover caudais bidirecionais [40]. Por outro lado, CV utiliza aberturas em diferentes fachadas, o que pode induzir caudais de maiores magnitudes [41].

Esta dissertação concentra-se na análise de sistemas DV, onde o único mecanismo é o efeito térmico, gerado através de fontes de calor internas e de ganhos solares [42]. Este tipo de ventilação natural teve origem na década de '80 nos países Nórdicos Europeus [43], onde inicialmente era

utilizado em instalações industriais. Este sistema tornou-se popular nos Estados Unidos da América e desde então o seu comércio tem tido uma grande evolução, sendo este instalado principalmente em edifícios e salas de serviços.

Nos sistemas DV, a diferença de temperaturas entre o interior e o exterior promove a diferença de densidades do ar. Quando a temperatura interior é superior à temperatura exterior, a densidade do ar interior é menor, promovendo a entrada de ar exterior no edifício. Deste modo, o ar é introduzido na sala ao nível do pavimento a baixa velocidade. Este ar novo distribui-se naturalmente por todo o pavimento até atingir uma fonte de calor, onde, devido ao efeito térmico, sobe em forma de pluma térmica. Os primeiros estudos científicos sobre o tema mostram que os sistemas DV apresentam um ambiente estratificado [44][45] (Figura 4), contrariamente aos sistemas de ventilação mecânica, onde a temperatura interior é uniformemente distribuída por toda a sala, criando um ambiente misturado. Com a necessidade de melhorar o desempenho deste sistema, Linden et al. [46] desenvolveu um modelo DV complexo onde são consideradas duas camadas de ar. O ponto que separa estas duas camadas (zona ocupada e camada misturada) é designado como altura neutra [47]. Este ponto é onde o caudal produzido pelas plumas térmicas é equivalente ao caudal de entrada no edifício. As maiores variações dos perfis de temperatura e CO₂ ocorrem entre o pavimento a altura neutra [72][48]. Acima desta altura, o ar que sobe proveniente das plumas recircula e cria uma camada de ar misturada com temperatura uniforme e uma elevada concentração de poluentes, que devem ser mantidos acima da cabeça dos ocupantes [49]. Para remover estes contaminantes o uso de chaminés térmicas é cada vez mais popular, visto que estas aumentam a distância entre a entrada e saída do ar, promovendo desta forma um aumento de caudal [50]. Prever e controlar a altura neutra é um dos maiores desafios quando se projeta um sistema deste tipo.

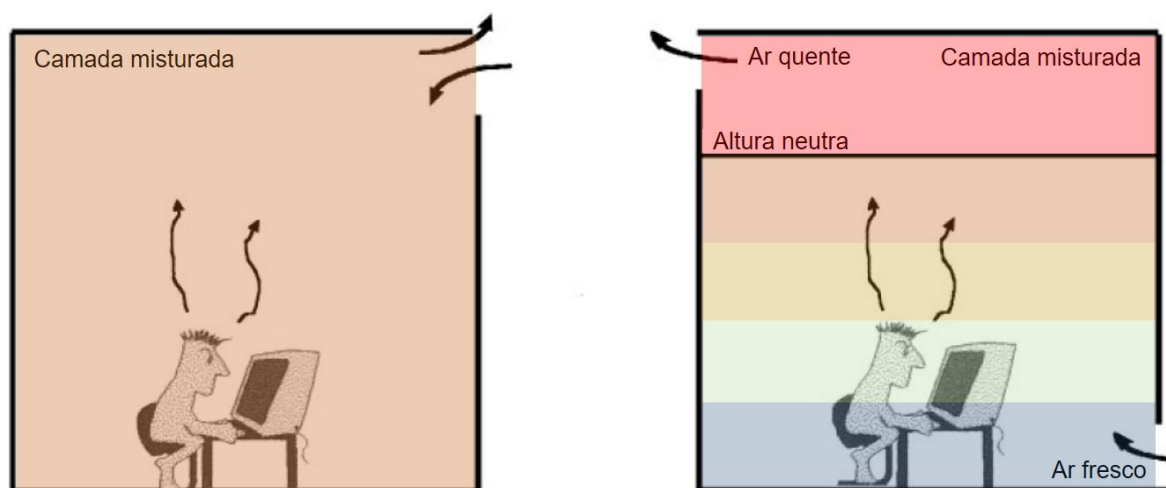


Figura 4: Esquema de ventilação natural – Adaptado de Linden (1999) [54]

No caso de células teste adiabáticas, como o caso estudado por Brohus et al. [51], a altura neutra nos perfis verticais de temperatura e CO₂ é similar, porque o alto nível de isolamento presente na envolvente da célula teste minimiza as perturbações no perfil de temperatura causadas pelas trocas de calor entre o ar e as superfícies. Nesta dissertação os ensaios decorreram num edifício real, e, naturalmente, existem trocas radiativas entre as superfícies em todas as camadas da sala. Isto dificulta a identificação da altura neutra no perfil de temperatura [52]. O perfil da concentração de

CO₂ não é afetado pelas trocas de calor, permitindo uma identificação visual mais clara da posição da altura neutra mesmo em edifícios reais [53].

Inicialmente, a solução proposta por Morton et al. [47] para determinar a variação vertical da altura neutra tinha como base a seguinte equação:

$$F = \frac{6}{5} \alpha^{\frac{4}{3}} \sqrt{\frac{9}{10}} \pi^{\frac{2}{3}} \sqrt{\frac{g\beta W}{\rho C_p}} h^5 \quad (6)$$

Onde:

F – Caudal de entrada [m³/s]

α – Constante *entrainment* do fluido [47], 0.13

W – Ganhos convectivos [W]

β – Coeficiente de expansão térmica [K⁻¹]

ρ – Densidade [Kg/m³]

C_p – Calor específico [J/Kg.K]

h – Altura neutra [m]

Para o cálculo da altura neutra (h) utilizou-se a seguinte expressão [23]:

$$h = 23.95 \sqrt[5]{\frac{F^3}{W}} \quad (7)$$

Quando existe mais que uma pluma térmica (n) [23]:

$$h = 23.95 \sqrt[5]{\frac{F^3}{W n^3}} \quad (8)$$

Onde:

n – Número de plumas térmicas

Para simplificar a análise de ventilação natural por deslocamento vertical de ar, utilizou-se o conceito de área efetiva de abertura, A* [54]. Para casos mais simples, salas com duas aberturas, esta área corresponde à área efetiva de ambas as aberturas. Esta é descrita pela equação 9:

$$A^* = \frac{C_d a_t a_b}{\left[\frac{1}{2} \left(\frac{C_d^2 a_t^2 + a_b^2}{c} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (9)$$

Onde:

C_d – Coeficiente de descarga

a_t – Área da abertura superior [m^2]

a_b – Área da abertura inferior [m^2]

c – Coeficiente de perda de carga

O caudal de entrada resultante pode ser determinado através da equação 10:

$$F = A^* [g'(H-h)]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Onde:

g' – Efeito térmico

H – Pé direito [m]

Pela análise das equações introduzidas neste capítulo verifica-se que os sistemas DV dependem de várias condicionantes: número de plumas, área efetiva de abertura e altura da chaminé térmica. No primeiro caso reduzir o número de plumas significa, teoricamente, um aumento da altura neutra. Para a área de abertura, aumentar este valor (maior A^*) conduz também a um incremento do caudal, que, consequentemente, eleva a posição da altura neutra, por aumentar o ponto onde o caudal de entrada iguala o caudal produzido pelas plumas térmicas. Por fim, um aumento da chaminé traduz-se, teoricamente, num maior caudal de ar, que, por sua vez, aumenta a altura neutra.

3.4. Simulação Térmica Dinâmica

Nos últimos anos, o uso de ferramentas de simulação térmica em edifícios tem aumentado significativamente, dado que muitos regulamentos térmicos exigem, em alguns casos, simulação térmica para edifícios novos ou grandes intervenções. Estes programas permitem estimar o comportamento térmico do edifício em estudo num período temporal definido pelo utilizador. Desta forma, é possível ter uma perceção dos seus consumos de energia e, consequentemente, apurar as eventuais medidas a aplicar.

Nesta dissertação foi utilizado o *EnergyPlus* como *software* de simulação térmica, com o objetivo de examinar a capacidade desta ferramenta computacional para modelar sistemas DV.

3.4.1. EnergyPlus

A versão do *EnergyPlus* utilizada ao longo desta dissertação é a 8.3.0. Este *software*, que é desenvolvido numa metodologia “*open-source*” (permite melhorias por parte de utilizadores

independentes), foi criado nos anos '80 pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (DOE) e tem como principal objetivo a análise energética e térmica de edifícios. Este programa tem como base outros dois programas: *DOE-2* e *BLAST* (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) [55]. A primeira versão do *EnergyPlus* foi lançada em 2001 e, desde então, tem sofrido constantes melhoramentos.

Para efetuar uma simulação dinâmica, o utilizador tem de fornecer ao programa diversas variáveis de *input*. Em primeiro lugar, é feita a geometria do edifício, utilizando um programa de desenho. Nesta dissertação a geometria foi realizada no *Google SketchUp*, mas existem vários *softwares*. De seguida a geometria é exportada para o *EnergyPlus* através do *plugin Open Studio*. Este *plugin* permite a constante alteração do modelo geométrico e do ficheiro de simulação. Posteriormente insere-se um ficheiro climático no programa referente à localização do edifício e definem-se as características principais do sistema, tais como: localização, horários, construção e materiais, sombreamentos, ocupação, iluminação, infiltração, sistemas de ventilação natural e/ou mecânica, entre outras.

A simulação dinâmica divide-se em três fases e os resultados dos processos anteriores vão servir como *inputs* dos processos seguintes, simplificando a análise térmica do edifício (Figura 5). A simulação inicia-se com a simulação do balanço energético, onde o programa calcula as condições de todas as zonas térmicas. De seguida, são determinadas as cargas de aquecimento e arrefecimento no intervalo de tempo definido pelo utilizador. Por fim, estes resultados servirão para atualizar as condições térmicas de cada zona. Assim, o *EnergyPlus* calcula o balanço térmico, a cada *timestep*, para uma zona *z* através da equação 11:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_s) + \dot{Q}_{sis} \quad (11)$$

Onde:

$C_z \frac{dT_z}{dt}$ – Energia armazenada no ar [W]

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ – Ganhos internos convectivos [W]

$\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ – Transferência de calor convectivo pela envolvente [W]

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ – Transferência de calor por mistura de ar entre zonas [W]

$\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_s)$ – Transferência de calor por infiltração [W]

\dot{Q}_{sis} – Carga térmica do sistema AVAC [W]

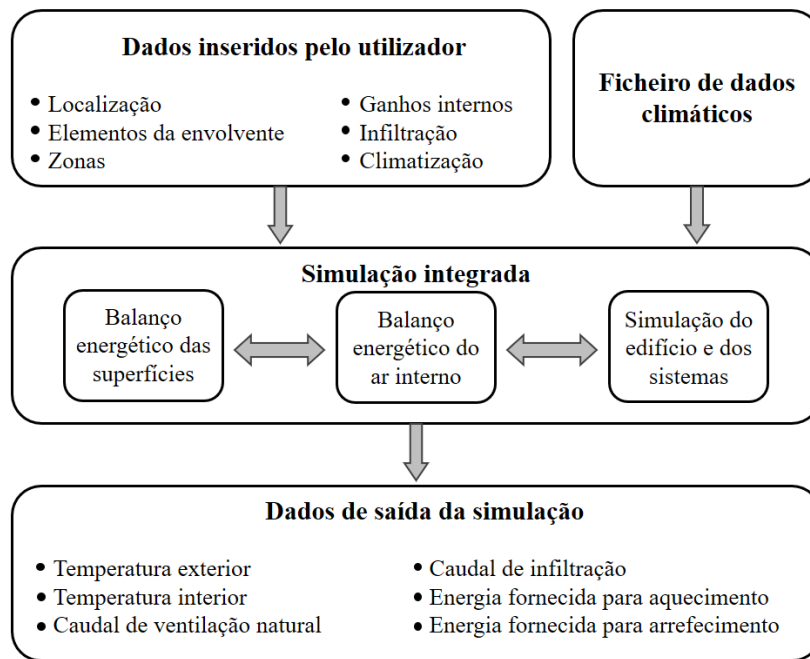


Figura 5: Etapas de simulação em EnergyPlus - Adaptado de Mateus (2012) [56]

3.5. Simulação Dinâmica de Fluidos

A simulação dinâmica de fluidos é um tema bastante complexo e estudado por grandes nomes da ciência moderna. Desde a antiga Grécia, com Arquimedes, passando por Leonardo Da Vinci e Isaac Newton, o escoamento de fluidos tem sido alvo de investigação constante. As equações de *Navier-Stokes* são a base desta mecânica de fluidos. Nos anos '60 e '70, a simulação de fluidos teve um importante avanço ao serem determinados códigos numéricos para quantificar as equações descritas anteriormente. Nos dias de hoje, existem diversos *softwares* de simulação dinâmica de fluidos e na presente dissertação utilizou-se o *PHOENICS*.

3.5.1. PHOENICS

O programa *PHOENICS* foi utilizado ao longo deste estudo com o objetivo determinar coeficientes de descarga efetuando simulações dinâmicas de fluidos. Este *software* de simulação existe desde 1981 e desde então tem sido base de diversos estudos realizados por engenheiros, arquitetos, professores universitários, etc. Este programa utiliza análise numérica e algoritmos de CFD para analisar o escoamento de um fluido e como esta atua à volta de um certo corpo [57]. O conceito de CFD é baseado nas equações de *Navier-Stokes*, que relaciona temperatura, velocidade, pressão e densidade. Esta ferramenta de simulação é dividida em três processos diferentes: pré-processamento, simulação e pós-processamento. Na primeira fase, é desenhado e caracterizado o modelo e define-se ainda outras variáveis, como o modelo de turbulência, o número de iterações e a *grid*. Durante a fase da simulação, o modelo é processado com recurso a modelos de turbulência previamente implementados no programa. Por fim, no pós-processamento, é possível visualizar os resultados obtidos. A principal característica desta ferramenta é a sua capacidade de simular

escoamentos laminares e turbulentos, compressíveis ou incompressíveis, estacionários ou transientes.

O CFD tem várias aplicações, tais como transferência de calor em processos industriais (caldeiras, equipamentos de combustão, bombas), aerodinâmica de veículos (terreos, aéreos e marítimos) e ventilação de edifícios.

Capítulo 4 – Casos de Estudo

As medições foram efetuadas em três locais diferentes: creche “Centro Infantil Maria de Monserrate”, denominada Creche Areeiro, sala da Universidade de Lisboa (pisos 2 do edifício C2) e creche “Algodão Doce”, designada Creche Telheiras. As três primeiras secções deste capítulo descrevem os edifícios em estudo, mais especificamente as salas onde se efetuaram as medições. Na secção 4.4 é descrito o procedimento experimental utilizado na determinação da emissividade dos simuladores humanos (cilindros) utilizados no decorrer dos ensaios. Na secção 4.5 são apresentados os procedimentos de medição e os instrumentos utilizados. Por fim, na última secção são descritas as configurações experimentais consideradas.

4.1. Creche Areeiro

A creche Areeiro (CA) é um edifício de dois pisos, situado na zona urbana de Lisboa. Esta foi construída em 2013 e apresenta uma área total de 680m² e um pé direito de 3m. Devido à necessidade de manter baixos custos de operação, a creche não apresenta nenhum sistema de arrefecimento instalado e é ventilada naturalmente. A Figura 6 apresenta o interior e o exterior da creche, onde é possível observar a configuração do sistema de ventilação natural. A imagem da esquerda faz referência à grelha de admissão, que permite a entrada de ar do exterior, e às chaminés que fazem a extração do ar interior. A imagem à direita mostra a sala de atividades onde decorreram os ensaios, com os cilindros com libertação de calor e CO₂ constante, que simulam ocupação real.



Figura 6: Vista interior, exterior configuração do sistema de medição da creche do Areeiro

Esta creche apresenta uma boa inércia térmica, pois as paredes são compostas por betão com isolamento exterior (os detalhes da construção estão descritos na Tabela 2). Para além disso, possui palas solares e vidros duplos de baixa emissividade ($U=3.1\text{W/m}^2\cdot\text{K}$; $g_{\text{vidro}}=0.6$) de forma a controlar os ganhos solares diretos.

Para edifícios deste tipo o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) [58] obriga a instalação de um sistema de aquecimento. Este edifício possui um radiador hidráulico, localizado junto à grelha de admissão de ar, que é alimentado por uma bomba de calor. Porém, este encontrou-se desligado durante as medições efetuadas.

Tabela 2: Propriedades dos materiais construtivos da Creche Areeiro

		<i>Material</i>	<i>Espessura (m)</i>	<i>Condutividade (W/m.K)</i>	<i>Densidade (Kg/m³)</i>	<i>Calor Específico (J/Kg.K)</i>
Envoltente Vertical Exterior	Exterior	<i>Reboco</i>	0.01	1.3	2000	653
		<i>Polistireno (XPS)</i>	0.08	0.04	40	2200
	Interior	<i>Betão armado</i>	0.13	2.3	2300	900
Envoltente Vertical Interior	Exterior	<i>Gesso cartonado</i>	0.025	0.25	900	1090
		<i>Espaço de ar</i>	0.05	0.03	1.16	1007
		<i>Lã de rocha</i>	0.07	0.04	40	840
	Interior	<i>Gesso cartonado</i>	0.025	0.25	900	1090
Cobertura Horizontal Exterior	Exterior	<i>Placas metálicas</i>	0.01	15.1	8055	480
		<i>Lã de rocha</i>	0.1	0.04	150	840
		<i>Espaço de ar</i>	0.05	0.03	1.16	1007
	Interior	<i>Painel lã de rocha em teto de gesso cartonado</i>	0.065	0.04	40	840
Cobertura Horizontal Interior	Exterior	<i>Painel lã de rocha em teto de gesso cartonado</i>	0.065	0.04	40	840
		<i>Espaço de ar</i>	0.05	0.03	1.16	1007
	Interior	<i>Laje de betão alveolar</i>	0.2	2.3	1375	400
Pavimento	Exterior	<i>Solo</i>	1.70	1.14	1000	1282
		<i>Enrocamento</i>	0.25	1.20	1000	800
	Interior	<i>Betão armado</i>	0.2	2.3	2240	400
Grelha de admissão de ar		<i>Alumínio</i>	0.02	160.00	2800	2800

Na creche Areeiro foram consideradas duas salas distintas para efetuar as medições:

- Sala CA0, localizada no piso 0 do edifício e possui uma chaminé de 4m de altura;
- Sala CA1, localizada no piso 1, com uma chaminé de 1m de altura.

Ambas as salas são orientadas a Noroeste. A Figura 7 apresenta as dimensões da sala e a disposição dos sensores. Em ambos os casos, para determinar o caudal de CO₂, colocaram-se sensores junto à grelha de admissão, na entrada de ar e dentro da chaminé. Para determinar os perfis verticais de temperatura e CO₂ foi instalada uma coluna vertical com sensores de temperatura e CO₂ (apenas temperatura para o caso CA0). A disposição dos simuladores é ilustrada na Figura 7. Nos casos de apenas uma pluma (CA1_1_1P e CA1_2_1P), esta encontra-se na posição 1 (centro da sala), agrupando todos os simuladores.

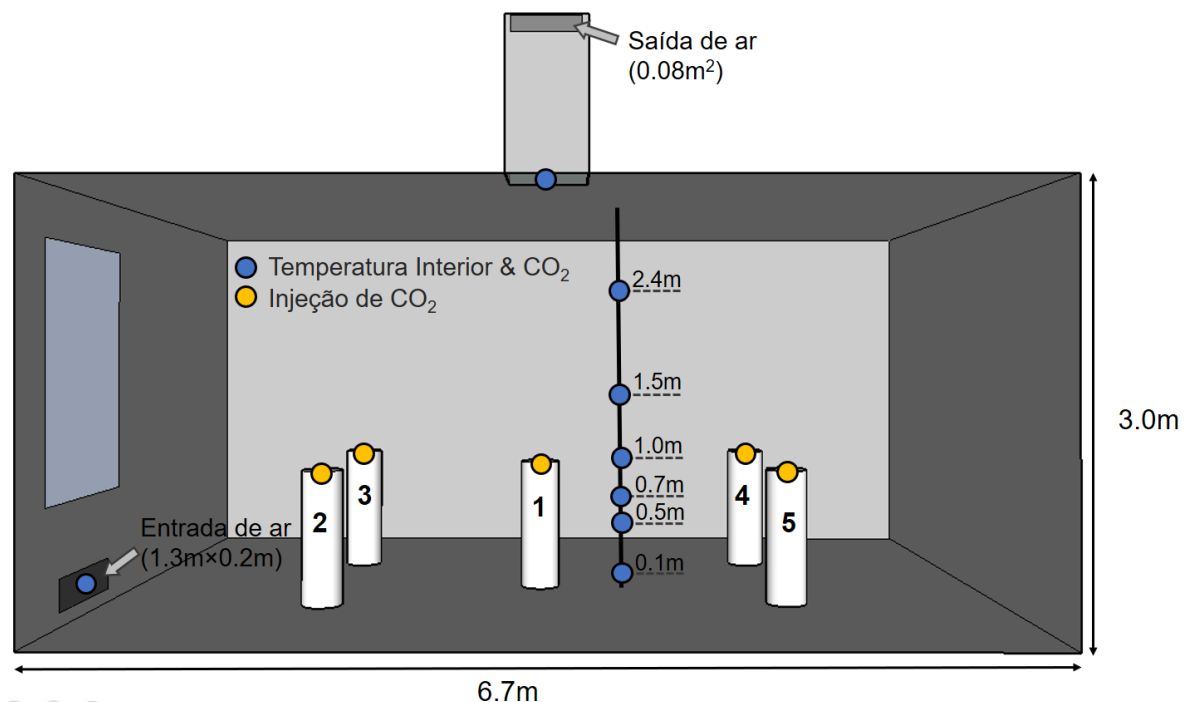


Figura 7: Esquema das medições efetuadas na Creche Areeiro

As medições efetuadas na creche Areeiro apresentam dois objetivos principais:

- Analisar o desempenho do sistema DV, através da variação do número de plumas, área de abertura da entrada de ar e da altura da chaminé;
- Validar a capacidade do *EnergyPlus* para simular sistemas DV, com o modelo DV de três-nós implementado no seu código.

4.2. Universidade de Lisboa

A segunda sala de aula onde foram efetuadas as medições localiza-se no piso 2 do edifício C2 da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (UL). Na Figura 8 é possível ter uma vista aérea da sala de aula, bem como duas vistas interiores com a disposição dos simuladores.



Figura 8: Vista aérea e interior da sala de aula da Universidade de Lisboa

O edifício onde se insere esta sala de aula foi construído nos anos 80, com uma base de betão armado, sem isolamento e vidros simples. Possui ainda sombreamento exterior em forma de pala, evitando ganhos solares diretos. Na Tabela 3, são apresentadas todas as camadas de construção bem como os seus constituintes e as suas propriedades.

Tabela 3: Propriedades dos materiais construtivos da Universidade de Lisboa

		<i>Material</i>	<i>Espessura (m)</i>	<i>Condutividade (W/m.K)</i>	<i>Densidade (Kg/m³)</i>	<i>Calor Específico (J/Kg.K)</i>
Envoltente Vertical Exterior	Exterior	<i>Tijolo</i>	0.11	0.89	1920	790
		<i>Betão armado</i>	0.11	2.3	2450	900
	Interior	<i>Reboco</i>	0.015	1.15	1950	653
Envoltente Vertical Interior	Exterior	<i>Reboco</i>	0.015	1.15	900	1090
		<i>Tijolo</i>	0.11	0.89	1920	790
	Interior	<i>Reboco</i>	0.015	1.15	900	1090
Cobertura Horizontal Interior e Exterior		<i>Betão armado</i>	0.2	2.3	2240	400

Esta sala de aula tem como principal característica a má qualidade de ar interior. Não possui ventilação mecânica e os níveis de ventilação natural são muito baixos, devido à não abertura das janelas, dado que o edifício localiza-se perto do aeroporto (ruído é elevado). Durante os períodos de aulas, a concentração de CO₂ atinge frequentemente valores acima de 2000ppm. Na tentativa de solucionar este problema foi instalada uma janela basculante no topo da sala (imagem central da Figura 8). Esta janela em conjunto com uma entrada de ar a nível baixo, na porta de entrada, cria um sistema de deslocamento vertical de ar. O ar novo provém do corredor, que está constantemente em contacto com o ar exterior.

Na Figura 9, são referidas as dimensões da sala e o esquema das medições efetuadas. Nestes ensaios registou-se novamente a temperatura vertical no centro da sala. Sensores de temperatura e CO₂ foram colocados na entrada e saída de ar. A disposição dos simuladores está representada na Figura 9.

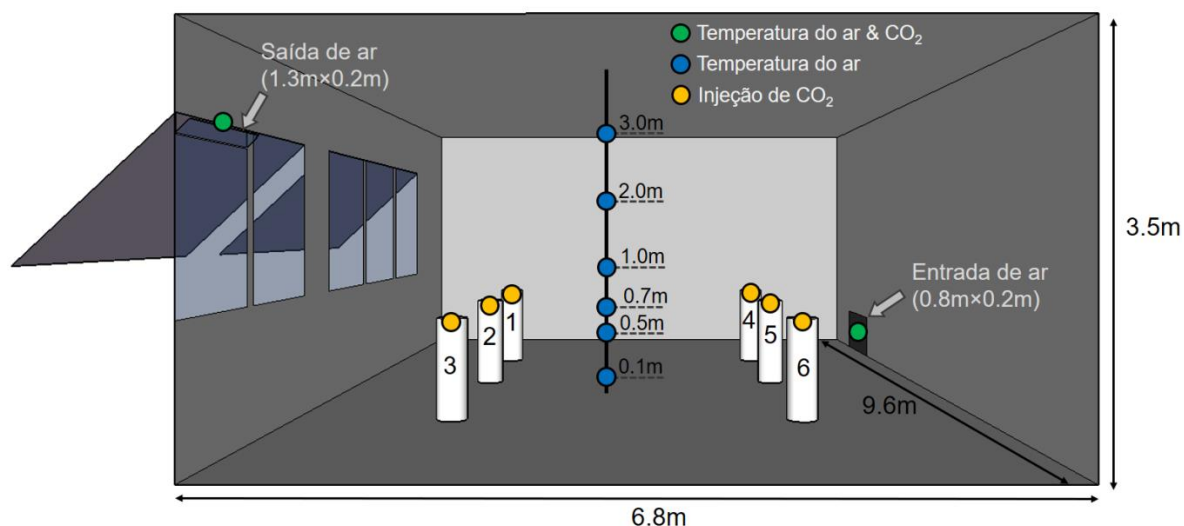


Figura 9: Esquema das medições efetuadas na Universidade de Lisboa

O caso UL tem como único objetivo examinar a capacidade do *software* de simulação térmica para simular sistemas DV. Como no caso anterior, esta validação vai ser realizada com o modelo DV de três-nós implementado no código do *EnergyPlus*. O caso UL não consta no capítulo dos resultados experimentais porque apenas se variou a área efetiva de abertura, resultado já estudado na creche Areeiro.

4.3. Creche Telheiras

A creche Telheiras (CT) é um edifício semelhante à creche Areeiro. Ambas as construções foram desenvolvidas no mesmo período e a sua base de edificação é bastante similar. Contrariamente à creche Areeiro, a creche Telheiras é constituída apenas por um piso. Esta escola apresenta uma área de 615m² e um pé direito de 3m.

O sistema de ventilação natural utilizado na creche Telheiras é similar ao que foi descrito na creche Areeiro, ou seja, com uma grelha de admissão que permite a entrada do ar novo e chaminés térmicas para extrair o ar contaminado. A Figura 10 apresenta a configuração deste sistema, nomeadamente a grelha de uma forma mais detalhada. À esquerda tem-se a vista do pátio da creche, enquanto à direita é visível o interior da sala e a disposição do radiador face à grelha de admissão. No meio da figura está representada a grelha, que é ajustável manualmente, permitindo controlar a entrada de ar exterior.



Figura 10: Vista do pátio, interior e grelha de admissão da creche Telheiras

Ambas as creches apresentam as mesmas soluções construtivas (disponível na Tabela 2) tendo ambas uma boa inércia térmica. A creche Telheiras e a creche Areeiro possuem ainda sombreamento exterior (imagem à esquerda da Figura 10).

Esta escola tem como único objetivo avaliar o desempenho do sistema de ventilação natural instalado. Assim, foram consideradas duas salas de atividades e o corredor. As salas de atividades têm a mesma dimensão, são orientadas a Este (ganhos solares idênticos), têm uma capacidade até 12 crianças e possuem o mesmo sistema de ventilação natural DV. O corredor está em contacto constante com o ar exterior, visto que a porta principal de entrada está situada nesta divisão. Durante o período total de medição, registaram-se os seguintes parâmetros:

- Sala de atividades 1 (SA1): Temperatura interior e concentração de CO₂;
- Sala de atividades 2 (SA2): Temperatura interior;
- Corredor: Temperatura interior.

O período total de ensaios foi de seis semanas e dividiu-se da seguinte forma:

- Semanas 1&2: 18 Abril – 1 Maio;
- Semanas 3&4: 16 Maio – 29 Maio;
- Semanas 5&6: 30 Maio – 12 Junho.

Os ensaios na SA1 e no corredor decorreram durante as seis semanas. Enquanto na SA2 apenas se registaram valores nas semanas 5&6. Os sensores foram colocados fora do alcance das crianças e em locais distantes da atividade dos professores e funcionários.

Esta creche, apesar de possuir um sistema de ventilação natural DV, não foi simulada em *EnergyPlus*. O objetivo principal desta dissertação é analisar a capacidade deste *software* para modelar sistemas DV, dado que não existem estudos de validação destes sistemas com esta ferramenta computacional. Para além disso, a competência do *EnergyPlus* a simular edifícios a longo prazo já foi comprovada cientificamente em diversos estudos [59][60].

Determinação da Emissividade dos Cilindros

Durante os ensaios, a ocupação das salas foi simulada através de cilindros com libertação de calor e CO₂ constante. Estes simuladores são compostos por três lâmpadas de 30W, perfazendo um total de 90W. As três lâmpadas são distribuídas uniformemente no interior do cilindro, juntamente com poliestireno extrudido (XPS), de forma que as lâmpadas nunca contactam com a superfície interior do mesmo.

Com o intuito de determinar a emissividade dos cilindros realizou-se um ensaio numa sala sem ventilação mecânica e sem ganhos internos adicionais. Colocou-se o cilindro na horizontal e após a estabilização das temperaturas, registou-se a temperatura superficial do cilindro e a temperatura ambiente, com sensores termopares tipo T, ligados diretamente a um *data logger* (Campbell Scientific: CR1000), que regista a temperatura a cada minuto. A temperatura foi medida em nove pontos diferentes do simulador. A média das temperaturas do cilindro ditou a temperatura final do mesmo.

Com o objetivo de determinar a emissividade do simulador, recorreu-se à seguinte expressão [35]:

$$q = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} = hA(T_s - T_{\infty}) + \varepsilon A \sigma (T_s^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (12)$$

Onde:

q – Fluxo total de calor [W]

h - Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m²K]

A – Área do cilindro [m²]

T_s – Temperatura do cilindro [K]

T_{∞} – Temperatura do ar exterior à camada limite [K]

ε – Emissividade do cilindro

σ – Constante de Stefan-Boltzmann, 5.67×10^{-8} [W/m².K]

As equações 12 e 13 representam o método da determinação do coeficiente de transferência de calor de um cilindro por convecção [35]:

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \quad (13)$$

$$Nu_D = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.599/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (14)$$

Onde:

Nu_D – Número de Nusselt

D - Diâmetro do cilindro [m]

k – Condutividade térmica do ar [W/m.K]

Ra_D – Número de Rayleigh

Pr – Número de Prandtl

Por fim, determinou-se a emissividade dos cilindros, obtendo-se um valor final de 0.35.

4.4. Monitorização dos Edifícios

Nas medições efetuadas para os casos CA e UL foram medidos os principais parâmetros que permitem examinar em detalhe um sistema de deslocamento vertical de ar e comparar resultados das medições com os das simulações, nomeadamente: temperatura vertical do ar, o caudal de

ventilação natural e a altura neutra. Os ensaios da creche Telheiras têm apenas o objetivo de analisar o desempenho do sistema de ventilação natural. Para isso, mediram-se apenas os indicadores que permitem avaliar a eficiência deste sistema e o seu impacto nas condições no interior da sala.

Na CA e na UL não se utilizou ocupação humana. A ocupação foi simulada através de cilindros com libertação de calor e de CO₂ constante (0,19l/s por ocupante). O caudal de ventilação natural foi determinado quando o sistema atingiu o equilíbrio e pode ser determinado através da equação 15 [61], onde o CO₂ foi utilizado como traçador [62].

$$F \text{ (m}^3\text{/s)} = \frac{CO_{2\text{Debitado}} \text{ (mg/s)}}{[CO_{2\text{out}}] - [CO_{2\text{in}}] \text{ (mg/m}^3\text{)}} \quad (15)$$

A Tabela 4 mostra as especificações dos instrumentos de medição utilizados. Esta inclui os sensores de CO₂, temperatura e os sensores da estação meteorológica, que contêm sensores de temperatura, humidade, velocidade e direção do vento e ainda a radiação global, difusa e direta.

A estação meteorológica está localizada no *campus solar* da Faculdade de Ciências. Os dados recolhidos têm um intervalo de dez minutos. Estes são posteriormente colocados no ficheiro climático do *EnergyPlus*, como será explicado futuramente neste documento.

Tabela 4: Especificações dos instrumentos de medição utilizados

Sensor	Medição	Especificações	
Lufft (<i>Weather Station 500</i>)	Temperatura	Alcance	-50 – 60°C
		Precisão	± 0,2°C
	Humidade relativa	Alcance	0 – 100% HR
		Precisão	± 2% HR
	Direção do vento	Alcance	0 – 359,9°
		Precisão	± 3°
	Velocidade do vento	Alcance	0 – 60m/s
		Precisão	± 0.3 m/s
EKO Instruments	<i>(MS-802 Pyranometer)</i> Radiação Global Horizontal	Alcance	0 – 4000 W/m ²
		Precisão	± 2 W/m ²
	Radiação Difusa Horizontal	Alcance	0 – 4000 W/m ²
		Precisão	± 2 W/m ²
	<i>(MS-56 Pyranometer)</i> Radiação Direta Normal	Alcance	0 – 4000 W/m ²
		Precisão	± 1 W/m ²
CO₂ Meter (<i>K-33 ELG</i>)	Dióxido de Carbono (indoor)	Alcance	0 – 10000 ppm
		Precisão	± 30ppm ou ± 3%
	Temperatura (indoor)	Alcance	-40 – 60°C
		Precisão	± 0.4°C at 25°C
Hobo (<i>U12-013</i>)	Temperatura	Alcance	-20 – 70°C
		Precisão	± 0.35°C
Telair (<i>7001</i>)	CO ₂	Alcance	0 – 4000 ppm
		Precisão	± 50 ppm ou ± 5%

Thermocouple omega (T-type)

Temperatura

Alcance
Precisão-17.8 – 93.6°C
± 1°C ou 0.75%

4.5. Configurações das Medições

Inicialmente, efetuaram-se sete medições (cinco na creche Areeiro e duas na UL). Estas incluem a variação do número de plumas térmicas, ganhos internos por fonte de calor e ainda áreas de abertura da entrada de ar. Na Tabela 5 é apresentado um resumo de todas as configurações em cada medição.

Para a determinação do valor do A^* recorreu-se à equação 9.

Tabela 5: Casos CA e UL

Casos		Nº de plumas	W/pluma	Área de abertura (%)		A^*
				A_{in}	A_{out}	
Creche Areeiro	CA0_1_5P	5	400	100	100	0.07
	CA1_1_5P	5	400	100	100	0.07
	CA1_2_5P	5	400	50	100	0.06
	CA1_1_1P	1	2000	100	100	0.07
	CA1_2_1P	1	2000	50	100	0.06
Sala de aula UL	UL_1_6P	6	308	100	50	0.09
	UL_2_6P	6	308	50	50	0.07

Na creche Telheiras registaram-se valores de temperatura interior em três divisões e de CO_2 apenas numa sala. Durante os ensaios, a abertura da chaminé esteve totalmente aberta em ambas as salas. Na SA1 a grelha de admissão de ar esteve sempre fechada, incluindo os períodos de ocupação. Na SA2 definiu-se uma área de abertura da grelha de 50%. Esta configuração manteve-se durante o período total dos ensaios, incluindo os períodos não ocupados. Logo, verifica-se o efeito da abertura da grelha de admissão de ar na temperatura interior da sala. As duas salas de atividades possuem sombreamento exterior controlado manualmente e este pode ter sido utilizado pelos ocupantes para reduzir os ganhos solares diretos.

Capítulo 5 – Resultados Experimentais

Neste capítulo vão ser discutidos os resultados obtidos das medições efetuadas na creche Areeiro e na creche Telheiras separadamente.

5.1. Creche Areeiro

Na creche Areeiro é discutida a influência do A^* , a variação do número de plumas e altura da chaminé na temperatura interior das salas e na posição da altura neutra.

Primeiramente é discutido o impacto do A^* na temperatura interior e na altura neutra. Comparando os casos CA1_1_5P e CA1_2_5P observa-se (Figura 11 à esquerda) que ao reduzir 50% da área de abertura da grelha de admissão (redução de 15% do A^*) a temperatura interior da sala aumenta. Este resultado vai de encontro com o esperado, visto que uma redução da área de abertura conduz a uma diminuição do A^* , que por sua vez leva a um decréscimo do caudal de entrada. Analisando a imagem à direita da Figura 11 conclui-se que uma diminuição do caudal de entrada significa também uma menor altura neutra, comprovando a equação 7.

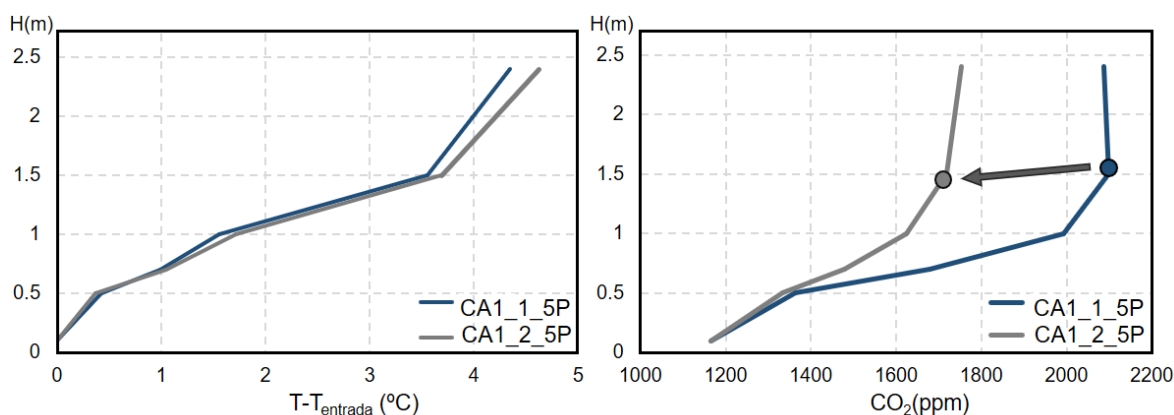


Figura 11: Impacto do A^* na temperatura interior e na altura neutra

Na Figura 12 é discutida a influência do número de plumas térmicas na temperatura interior e na altura neutra. Ao aumentar o número de plumas, de uma (CA1_1_1P) para cinco (CA1_1_5P), é notória a redução da temperatura interior da sala (imagem à esquerda). Um aumento do número de plumas conduz assim a um incremento do caudal. Na altura neutra (imagem à direita) observa-se que a diminuição do número de plumas leva a um aumento da altura neutra, confirmando a equação 8.

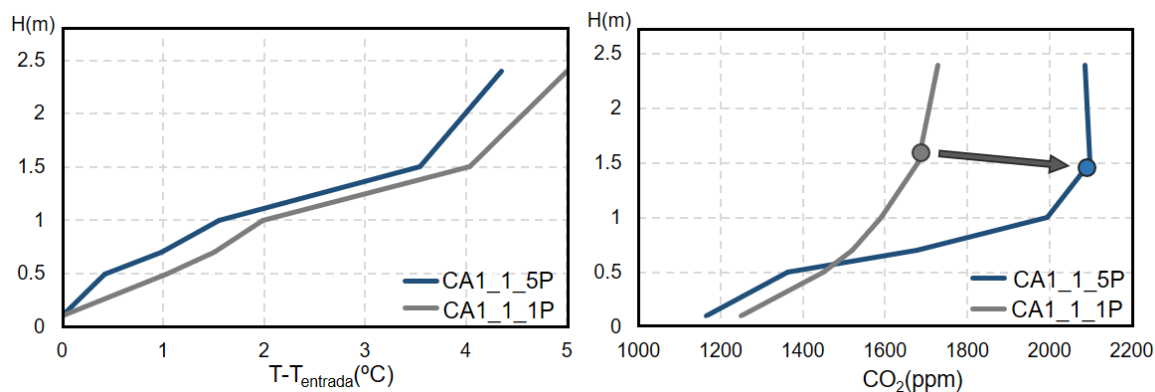


Figura 12: Impacto do número de plumas na temperatura interior e na altura neutra

Na Figura 11 e na Figura 12 é evidente a influência das trocas radiativas (na camada misturada) nos perfis de temperatura quando comparados aos perfis de CO_2 . Por consequente, determinar a altura neutra examinando visualmente estes perfis não é o método mais apropriado e pode, por vezes, induzir em erro. Modelos analíticos validados são desta forma uma fonte fidedigna de determinação deste importante parâmetro.

A Figura 13 mostra a comparação da temperatura interior entre a sala do piso 0 (CA0_1_5P) e do piso 1 (CA1_1_5P), onde é evidente o resultado da variação da altura da chaminé térmica. Como esperado, uma altura da chaminé superior (4m no caso CA0) aumenta o caudal de ar na sala, através do efeito chaminé, que resulta numa temperatura interior mais baixa. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Krausse et al. (2007) [63], que ao analisar o efeito da ventilação natural numa biblioteca conclui que os pisos superiores do edifício estão mais quentes devido ao menor efeito chaminé. Em 2000, Khedari et al. [64] também comprovou que o uso de chaminés reduz a temperatura interior dos edifícios.

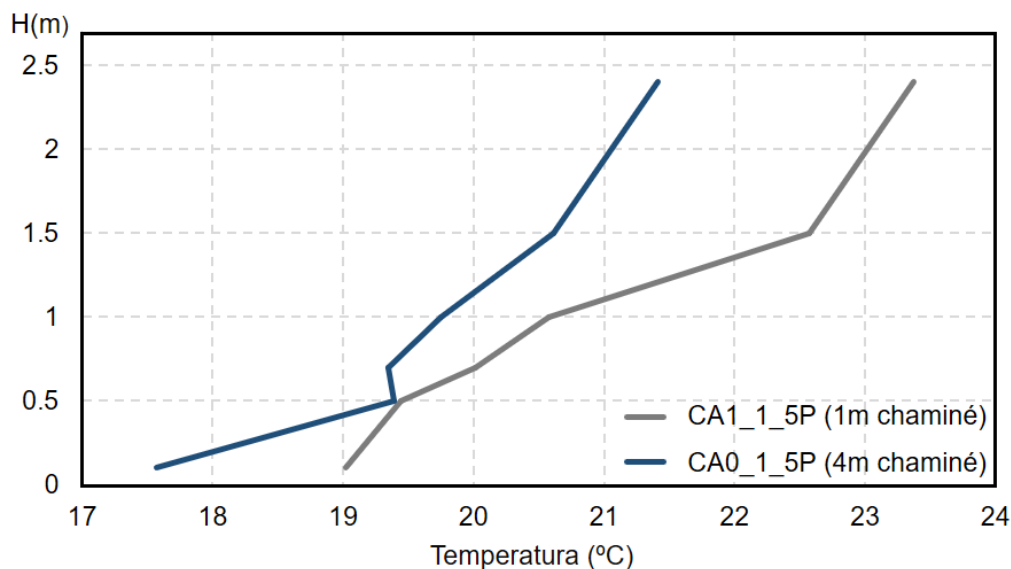


Figura 13: Impacto da altura da chaminé na temperatura interior

5.2. Creche Telheiras

Na creche Telheiras as medições efetuadas têm como principal objetivo avaliar o desempenho do sistema de ventilação natural. Para isso, os perfis de temperatura interior e a concentração de CO₂ são determinantes para esta análise.

Nas duas primeiras semanas registaram-se valores de temperatura interior da SA1 (azul) e do Corredor (azul escuro), temperatura exterior (laranja) e concentração de CO₂ na SA1 (cinzento). A Figura 14 faz referência ao perfil dos parâmetros medidos. Tanto a SA1 como o corredor mantêm sempre temperaturas inferiores a 25°C, mesmo quando a temperatura exterior atinge valores próximos dos 30°C. Estes valores estão de acordo com os estabelecidos pela norma Europeia EN 15251 [66] para creches (19°C-26°C). A qualidade do ar interior é boa e apenas por quatro vezes ultrapassa os 1400ppm, o que corresponde somente a quarenta minutos acima deste valor, uma vez que os dados recolhidos têm um intervalo de dez minutos. Segundo o RECS, a média de oito horas consecutivas da concentração de CO₂ não deve exceder 1625ppm [58][67], o que nunca se verifica.

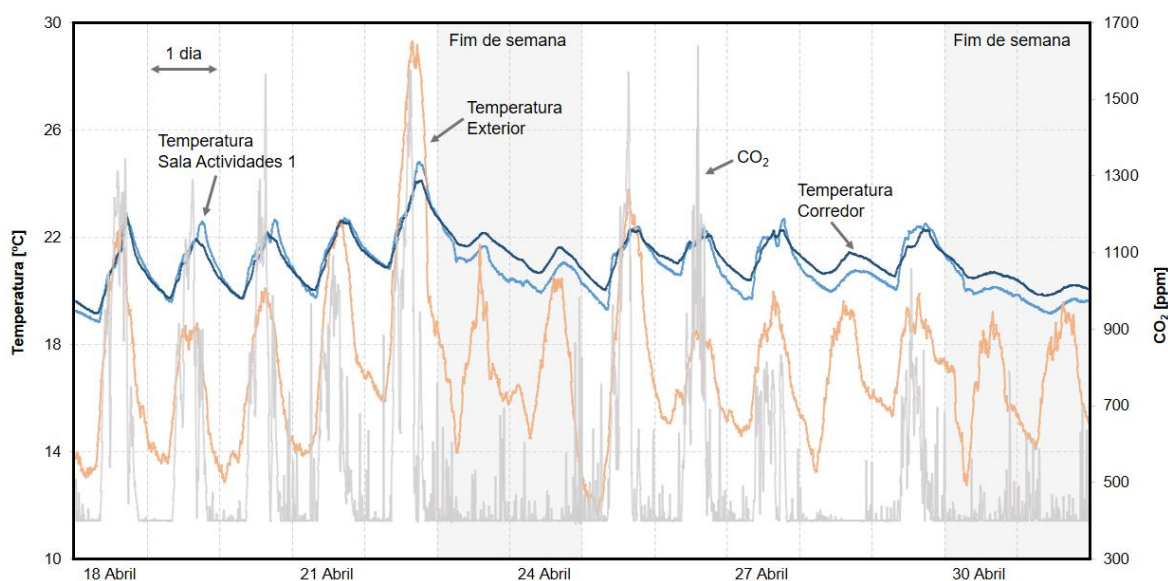


Figura 14: Resultados de duas semanas de medição na creche Telheiras

Na Figura 15 observa-se os resultados obtidos nos ensaios realizados nas semanas 3&4 e 5&6. Apenas foi adicionado um parâmetro (temperatura da SA 2 – azul claro) relativamente à Figura 14. Os resultados revelam que o sistema de ventilação tem a capacidade de:

- Manter a temperatura interior dentro dos limites de conforto, segundo a norma EN 15251, mesmo com temperaturas exteriores acima dos 30°C;
- Fornecer magnitudes de caudal suficientes para não ultrapassar os limites estabelecidos pelo regulamento RECS.

Como o esperado, quando os ocupantes começam a sua atividade a concentração de CO₂ e a temperatura interior começam a aumentar e só se verifica uma diminuição destes valores no final

do dia de trabalho. A configuração para a grelha da SA2 revelou ser eficiente, dado que a temperatura desta sala encontra-se inferior à SA1 e ao Corredor em cerca de 0.45°C e 0.61°C respetivamente.

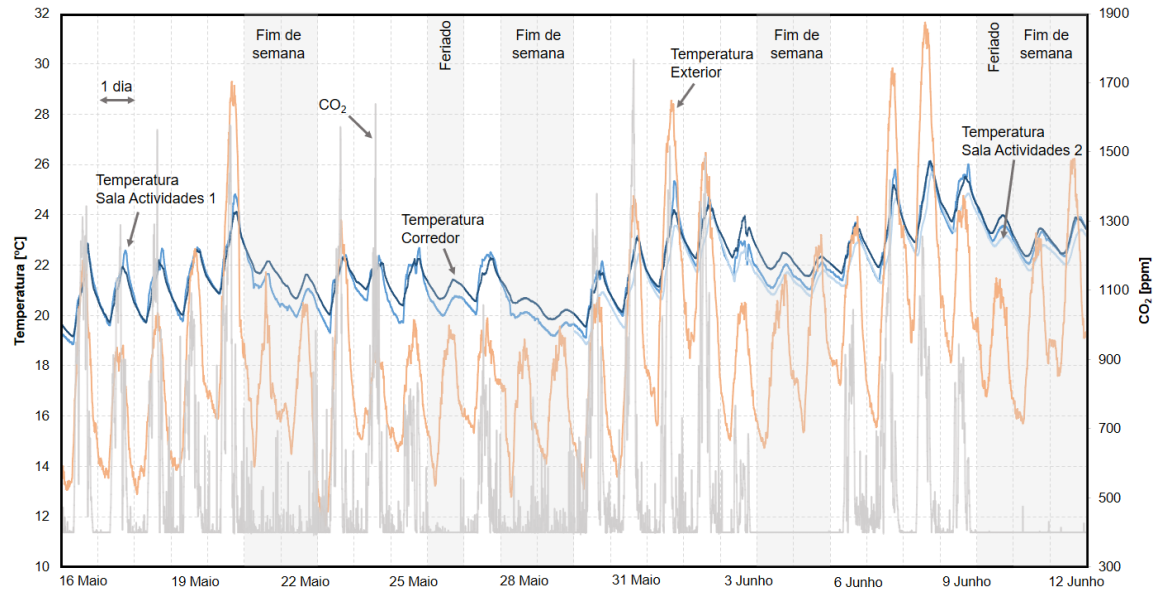


Figura 15: Resultados de um mês de medição na creche Telheiras

Capítulo 6 – Simulação Dinâmica - EnergyPlus

Como foi referido anteriormente, as simulações foram realizadas utilizando o *software EnergyPlus*. As simulações térmicas apenas foram efetuadas para os casos da creche Areeiro e da UL, pois foram as únicas escolas onde se registaram perfis verticais de temperatura e CO₂, de forma a validar a capacidade da ferramenta computacional para determinar nós de temperatura em sistemas DV.

Inicialmente, foram definidas as zonas térmicas para cada caso. Para os três modelos (CA0, CA1 e UL) consideraram-se duas zonas térmicas: sala de atividades e chaminé térmica (Figura 16), para a creche Areeiro; sala de aula e corredor (Figura 17) para a UL, visto que o ar introduzido na sala provém diretamente do corredor. Na creche Areeiro e na UL as duas zonas térmicas estão separadas por uma abertura horizontal virtual. Esta abertura é desenhada como um vidro, com elevados valores de condutividade térmica e transmissão solar, e tem como principal característica estar sempre aberta. Na UL registou-se a temperatura proveniente do corredor para o interior da sala e foi criada uma folha de cálculo (.csv) onde se introduziu estas temperaturas. No *EnergyPlus*, esta folha de cálculo foi importada através do comando “*Schedule: File*”. Posteriormente esta folha de cálculo impõe a temperatura de entrada do ar na sala.

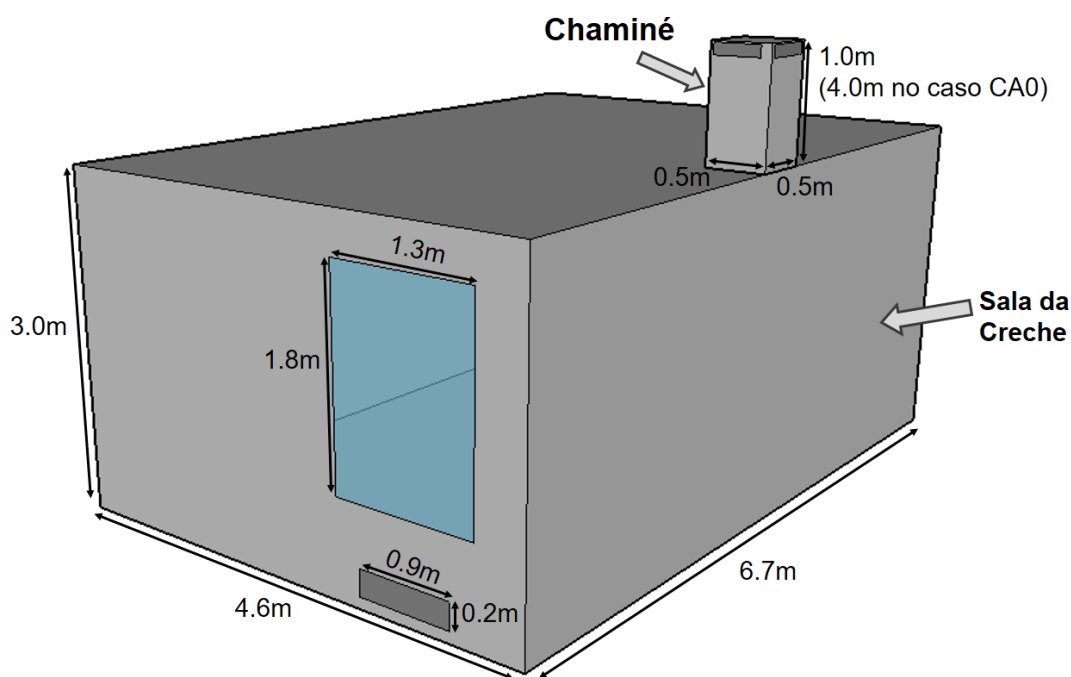


Figura 16: Zona térmica e respetivo modelo geométrico da Creche Areeiro

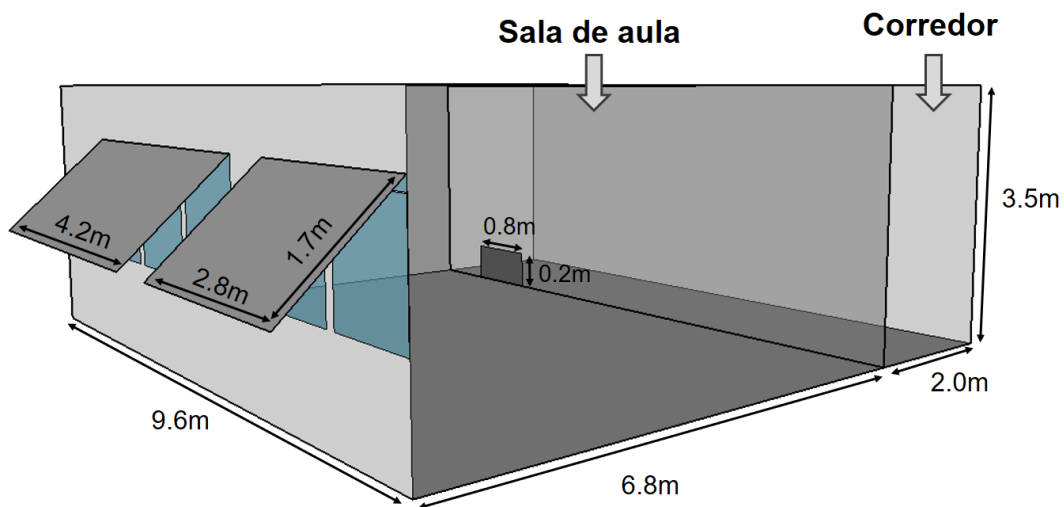


Figura 17: Zona térmica e respetivo modelo geométrico da Universidade de Lisboa.

Para modelar a distribuição solar foi utilizada a aproximação “*Full Interior and Exterior*”. Esta aproximação calcula a quantidade de radiação solar que atinge todas as superfícies da zona simulada, tendo ainda em conta os efeitos de sombreamento exterior, como palas ou obstruções.

Para aproximar as simulações da realidade criou-se um ficheiro climático, baseado nos dados meteorológicos registados durante o período das medições. O EPW (*EnergyPlus Weather*) é o ficheiro climático aceite pela ferramenta de simulação. Tendo como base o ficheiro climático disponibilizado pelo *EnergyPlus* [68], introduziram-se os dados registados pela estação meteorológica da Faculdade de Ciências. O EPW solicita valores de temperatura ambiente, radiação difusa horizontal, radiação direta normal, humidade relativa, direção e velocidade do vento. A descrição dos materiais da envolvente (espessura, condutividade, densidade e calor específico) foi inserida no programa, bem como a ordem construtiva dos mesmos.

A ocupação, esquematizada com cilindros com libertação de calor e CO₂ constante, foi simulada tendo em conta a sua potência e a fração radiante. Nos casos de apenas uma pluma térmica (CA1_1_1P e CA1_2_1P) somam-se os ganhos de todos os simuladores para modelar a ocupação.

O *EnergyPlus* considera por defeito que o ar do compartimento está totalmente misturado e através do comando “*Room Air Model Type*” é selecionado o modelo DV implementado no programa, de forma à temperatura ser modelada em três nós. Posteriormente, na opção “*Room Air Settings*” define-se o número de plumas por ocupante.

De modo a simular a ventilação natural foi utilizado o modelo *Airflow Network* [69]. Este modelo permite simular, para várias zonas, o caudal de ar gerado pelo efeito do vento ou pelo efeito térmico. No primeiro caso, é possível definir manualmente os coeficientes de pressão ou gerar os mesmo para um edifício isolado. No entanto, os edifícios em estudo encontram-se num ambiente urbano e rodeados por outros edifícios, o que resulta numa redução da velocidade do vento. Durante as medições, verificou-se ainda que a velocidade média do vento foi sempre inferior a 0.5m/s. Este efeito combinado com a configuração das aberturas (desenhadas para reduzir o efeito do vento) faz com que o efeito do vento seja insignificante, sendo apenas o efeito térmico considerado nas simulações. O coeficiente de descarga é uma das características mais importantes a

definir no modelo *Airflow Network*. Este coeficiente afeta diretamente o caudal de ar que atravessa a abertura. No caso da sala de aula da UL, a janela instalada é comercializada e por isso assumiu-se um valor de 0.6 para o seu coeficiente de descarga (c_d) [70]. A creche Areeiro possui um sistema complexo de entrada (grelha de admissão e radiador) e saída (chaminé térmica com placas perfuradas) de ar que não vai de encontro aos valores tabelados. Assim, foram realizadas simulações de CFD para determinar o coeficiente de descarga de ambas as aberturas. A metodologia deste processo e os resultados obtidos encontram-se na secção 6.2.

6.1. Modelo DV de três-nós

De acordo com Mateus et al. [23], para modelar corretamente a estratificação do ar em espaços com sistemas de deslocamento vertical de ar são necessários, pelo menos, três-nós de temperatura. Nesta dissertação, o modelo utilizado [23] considera o ar perfeitamente misturado em cada um dos nós e uma variação linear de temperatura entre nós. Os três nós usados são (Figura 18):

- T_{Af} – representa a temperatura média na zona perto do chão (0.1m).
- T_{Oc} – caracteriza a temperatura média na zona ocupada (0.7m para ocupantes sentados e 0.9m para ocupantes em pé).
- T_{MX} – representa a região isotérmica acima dos ocupantes, até ao teto, e determina a temperatura do ar na saída.

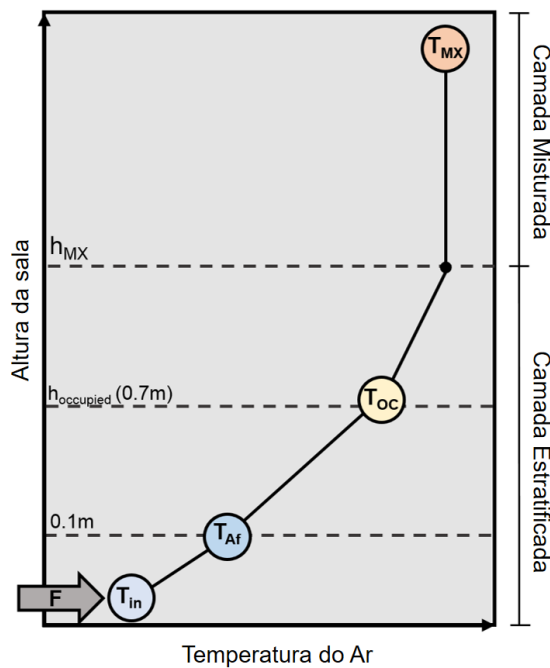


Figura 18: Modelo DV de três-nós

Os autores deste modelo [23] utilizam as seguintes equações de conservação de energia para o cálculo dos três nós:

$$\rho C_p F T_{in} + I_M \rho C_p F T_{Oc} + A_f h_f (T_f - T_{Af}) = (1 + I_M) \rho C_p F T_{Af} \quad (16)$$

$$(1+I_M)\rho C_p F T_{Af} - I_M \rho C_p F T_{OC} + F_{MO} F_{GC} G + A_{wl} h_{wl} (T_{wl} - T_{OC}) = \rho C_p F T_{OC} \quad (17)$$

$$\rho C_p F T_{OC} + F_{GC} G (1 - F_{MO}) + A_c h_c (T_c - T_{MX}) + A_{wu} h_{wu} (T_{wu} - T_{MX}) = \rho C_p F T_{MX} \quad (18)$$

Onde:

F – Caudal de ar [m³/s]

I_M – Percentagem de mistura entre o ar de entrada e o ar da sala, 0.6

A_f – Área do pavimento [m²]

h_f – Coeficiente de transferência de calor do pavimento [W/mK]

T_f – Temperatura do pavimento [°C]

F_{MO} – Fração de ganhos convectivos na zona ocupada, 0.4

F_{GC} – Fração de ganhos convectivos

G – Ganhos internos totais [W]

A_{wl} – Área inferior das paredes laterais [m²]

A_c – Área da cobertura [m²]

A_{wu} – Área superior das paredes laterais [m²]

Para o cálculo das trocas radiativas entre superfícies, os autores [23] consideram ainda as seguintes equações:

$$h_c (T_c - T_{MX}) + h_{rc} \left(T_c - \frac{T_f A_f + T_{wl} A_{wl} + T_{wu} A_{wu}}{A_t - A_c} \right) = \frac{F_{GR} G}{A_t} \quad (19)$$

$$h_f (T_f - T_{Af}) + h_{rf} \left(T_f - \frac{T_c A_c + T_{wl} A_{wl} + T_{wu} A_{wu}}{A_t - A_f} \right) = \frac{F_{GR} G}{A_t} \quad (20)$$

$$h_{wl} (T_{wl} - T_{OC}) + h_{rwl} \left(T_{wl} - \frac{T_c A_c + T_f A_f + T_{wu} A_{wu}}{A_t - A_{wl}} \right) = \frac{F_{GR} G}{A_t} \quad (21)$$

$$h_{wu} (T_{wu} - T_{MX}) + h_{rwu} \left(T_{wu} - \frac{T_c A_c + T_f A_f + T_{wl} A_{wl}}{A_t - A_{wu}} \right) = \frac{F_{GR} G}{A_t} \quad (22)$$

Onde:

h_c – Coeficiente de transferência de calor da cobertura [W/mK]

h_{wu} – Coeficiente de transferência de calor da cobertura [W/mK]

h_{wl} – Coeficiente de transferência de calor da cobertura [W/mK]

T_c – Temperatura da cobertura [°C]

T_{wl} – Temperatura da parte inferior das paredes [°C]

T_{wu} – Temperatura da parte superior das paredes [°C]

T_{MX} – Temperatura do nó da camada misturada [°C]

T_{OC} – Temperatura do nó da zona ocupada [°C]

T_{Af} – Temperatura do nó perto do pavimento [°C]

A_t – Área total de todas as superfícies [°C]

h_{rc} – Coeficiente de transferência de calor radiativo da cobertura [W/mK]

h_{rf} – Coeficiente de transferência de calor radiativo do pavimento [W/mK]

h_{rwl} – Coeficiente de transferência de calor radiativo da parte inferior das paredes [W/mK]

h_{rwl} – Coeficiente de transferência de calor radiativo da parte superior das paredes [W/mK]

F_{GR} – Fração de ganhos radiativos

De forma a validar o *software EnergyPlus* as sete equações anteriores (Equação 16 – 22) foram implementadas no código da ferramenta de simulação térmica.

6.2. Determinação do Coeficiente de descarga

Nesta secção, são apresentadas simulações de CFD, com o objetivo de determinar os coeficientes de descarga da grelha de admissão e da chaminé térmica da creche Areeiro. Este sistema DV (grelha e chaminé), possui um mecanismo particular e complexo que requiere um estudo mais detalhado de forma a obter resultados mais realísticos.

Devido à natureza destas simulações, não foi considerado o efeito térmico, apenas o efeito do vento. Os sistemas de configuração da entrada e da saída foram simulados separadamente. O modelo de turbulência utilizado foi o *standard k-ε* e o número de iterações foram 5000 em todas as simulações.

A Figura 19, no lado esquerdo, mostra a geometria utilizada nas simulações da grelha de admissão de ar. O desenho da entrada inclui também o radiador, junto à grelha, que influencia diretamente a passagem do ar. Considerou-se um domínio de 26.4m^3 ($3.3\text{m} \times 4\text{m} \times 2\text{m}$) e definiu-se, à entrada, uma janela (*outlet*) com pressão de 20Pa, de forma a definir a sentido de passagem do ar. O resto do domínio foi definido como paredes (*plates*) de modo a evitar admissão ou extração de ar. Por fim, o PHOENICS tem uma constante (R1) como *output*, que fornece o valor do caudal. Para confirmar o valor dado pelo programa, multiplicou-se a velocidade (m/s) na entrada pela área (m^2) respetiva e pela densidade (kg/m^3) do ar, obtendo um caudal mássico (Kg/s).

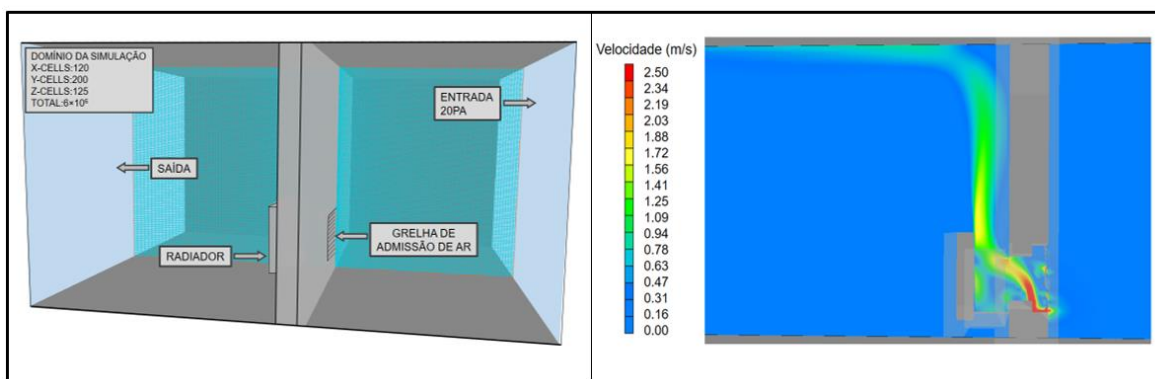


Figura 19: Difusor – geometria e resultados CFD

A metodologia descrita anteriormente também se aplica para a determinação do coeficiente de descarga da chaminé térmica. Do lado esquerdo da Figura 20, é apresentada a geometria. Neste

caso o domínio possui um volume total de 144m^3 ($6\text{m} \times 6\text{m} \times 4\text{m}$) e a câmara onde se encontra a chaminé térmica tem um volume de 4m^3 ($2\text{m} \times 2\text{m} \times 1\text{m}$). A chaminé tem um raio de 0.15m e 1m de altura. Esta no topo contém uma placa opaca (distância em $z=0.1\text{m}$) e em redor da chaminé encontram-se placas perfuradas (permeabilidade de 15% e com um raio 0.19m), modeladas com a opção do *software* “*CIBSE perforated plates*”. Na entrada de ar foi novamente definida uma *outlet* com uma pressão de 20Pa .

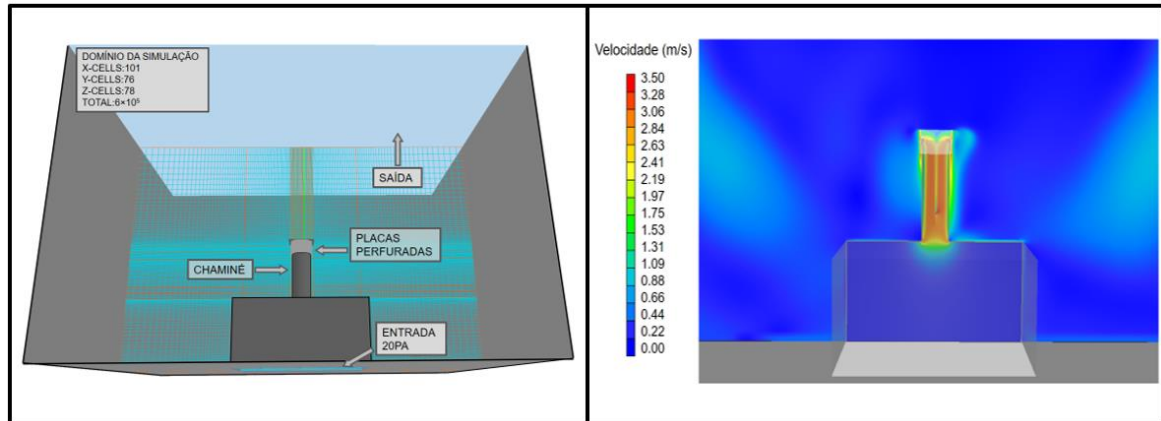


Figura 20: Chaminé - geometria e resultados

Devido à complexidade das geometrias apresentadas, os desenhos da grelha de admissão de ar e da chaminé térmica foram produzidos num *software* em separado. Para essa finalidade utilizou-se o *Autocad Civil 3D*, e as geometrias foram exportados para o PHOENICS (com a extensão .stl).

Assim, o coeficiente de descarga foi calculado através da equação 23 [71]:

$$C_d = \frac{F}{A_{\text{Abertura}} \times \sqrt{2 \times \rho \times \Delta P}} \quad (23)$$

Onde:

C_d – Coeficiente de descarga

F – Caudal mássico [Kg/s]

ρ – Densidade do ar, $1.189 [\text{kg/m}^3]$

ΔP – Diferença de pressão, $20 [\text{Pa}]$

Para ambos os casos foi feita uma análise de sensibilidade da rede, utilizando três níveis de números de células. Desta forma, a Tabela 6 apresenta valores do coeficiente de descarga para diferentes números de células e mostra ainda a independência dos resultados perante o refinamento da *grid*.

Tabela 6: Análise da *grid* para determinação do coeficiente de descarga

Abertura	Número de células	Coeficiente de descarga
Entrada	3.0×10^6	0.30
	6.0×10^6	0.32
	9.0×10^6	0.32
Saída	3.0×10^5	0.49
	6.0×10^5	0.50
	9.0×10^5	0.50

Capítulo 7 – Validação dos Resultados

Neste capítulo é apresentada a validação do *EnergyPlus* com base nos ensaios experimentais (Tabela 5). As simulações são examinadas através da comparação dos seguintes parâmetros: caudal (F), altura neutra (h) e temperatura dos três nós do modelo DV. As diferenças entre os resultados medidos e os simulados para o caudal e para a altura neutra podem ser quantificadas através dos seguintes indicadores:

$$\text{Desvio médio (l/s)} = F_{\text{simulado}} - F_{\text{medido}} \quad (24)$$

$$\text{Erro (\%)} = 100\% \times \left| \frac{F_{\text{simulado}} - F_{\text{medido}}}{F_{\text{medido}}} \right| \quad (25)$$

$$\text{Desvio Médio (m)} = h_{\text{simulado}} - h_{\text{medido}} \quad (26)$$

$$\text{Erro (\%)} = 100\% \times \left| \frac{h_{\text{simulado}} - h_{\text{medido}}}{h_{\text{medido}}} \right| \quad (27)$$

Primeiramente relacionam-se os valores de caudal medidos com os simulados. Para este parâmetro obteve-se um desvio médio de cerca de 10l/s e um erro médio de 16.7%. A comparação entre os casos CA1_1_5P e CA0_1_5P (4m e 7m de efeito chaminé, respetivamente) mostra, como o esperado, um aumento de 170% do caudal no caso da maior chaminé. Ao comparar os casos CA1_1_5P e CA1_2_5P, seria de esperar um maior caudal no caso com maior valor de A*, o que não se verifica nos resultados práticos, apenas nos simulados. Por outro lado, equiparando os casos CA1_1_5P e CA1_1_1P observa-se uma equivalência dos valores medidos e, contrariamente ao expectável, nos resultados simulados um aumento do número de plumas leva a uma redução do caudal. No caso UL, uma redução de 28% do A* traduz-se numa redução do caudal na ordem dos 74%.

Tabela 7: Comparação entre caudal medido e simulado

Caso	F _{medido} (L/s)	F _{simulado} (L/s)	Desvio médio (m)	Erro (%)
CA0_1_5P	190	130	-60	31.6
CA1_1_5P	70	80	10	14.3
CA1_2_5P	80	63	-17	21.3
CA1_1_1P	70	87	17	24.3
CA1_2_1P	80	63	-17	21.3
UL_1_6P	199	196	-3	1.5
UL_2_6P	114	111	-3	2.6
Erro médio			-10	16.7

Na altura neutra verifica-se um desvio médio de -0.08m, que é pouco significativo, enquanto o erro médio é inferior a 12%, demonstrando a validade do modelo utilizado para determinar este parâmetro. Nos dois primeiros casos, um aumento na altura da chaminé leva a um aumento do caudal e, consequentemente, da altura neutra, tanto nos resultados medidos como nos simulados.

Ao equiparar os casos CA1_1_5P e CA1_2_5P observa-se que o valor da altura neutra é equivalente nos resultados medidos. Relativamente aos resultados simulados, existe uma redução na posição da altura neutra no caso CA1_2_5P, indo de encontro com os resultados pretendidos. Ainda na creche Areeiro, uma diminuição do número de plumas resulta num aumento significativo da posição da altura neutra. No caso UL, ao reduzir a área de abertura verifica-se uma diminuição no valor da altura neutra como previsto.

Tabela 8: Comparação entre altura neutra medida e simulada

Caso	h_{medido} (m)	h_{simulado} (m)	Desvio médio (m)	Erro (%)
CA0_1_5P	1.1	1.0	-0.11	10.0
CA1_1_5P	0.8	0.7	-0.02	2.6
CA1_2_5P	0.8	0.6	-0.16	20.0
CA1_1_1P	1.5	1.5	0.05	3.4
CA1_2_1P	1.5	1.2	-0.31	20.1
UL_1_6P	1.1	1.0	-0.13	11.8
UL_2_6P	0.9	1.0	0.10	11.8
Erro médio			-0.08	11.4

Na Figura 21 é feita a comparação entre os resultados medidos e os simulados. Para o caudal obteve-se um coeficiente de correlação (R^2) de 0.77, ao passo que para a altura neutra este coeficiente assume um valor de 0.79. Estes resultados demonstram a correlação positiva existente entre os resultados medidos e simulados para ambos os parâmetros.

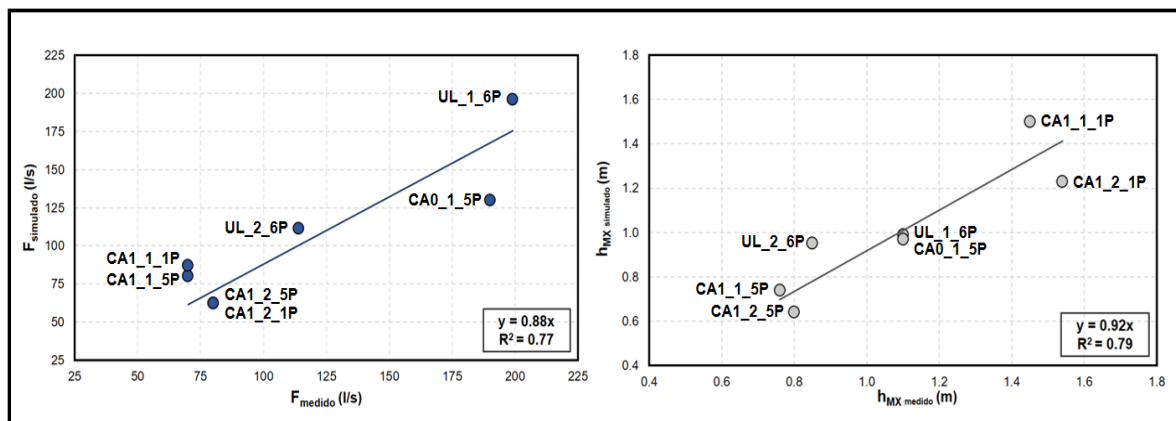


Figura 21: Resultados da altura neutra e da taxa de renovação de ar: comparação entre medido e simulado

De modo a analisar a temperatura de cada nó recorre-se às seguintes expressões:

$$\text{Diferença de Temperatura Média (°C)} = |\text{Simulado} - \text{Medido}| \quad (28)$$

$$\text{Desvio Médio (°C)} = \text{Simulado} - \text{Medido} \quad (29)$$

$$\text{Erro Médio (\%)} = \left| \frac{\text{Simulado} - \text{Medido}}{\text{Medido}} \right| \quad (30)$$

A Tabela 9 faz referência aos valores médios de erro para os perfis de temperatura nos sete casos. O erro médio é de 4%, o que corresponde a uma diferença de temperatura de 0.7°C. O nó com maior erro, T_{AF} (8%), prevê temperaturas sempre abaixo dos valores registado nas medições. Este problema foi previamente observado em diversos estudos de validação [23, 72]. Nos restantes nós, T_{OC} e T_{MX}, o erro máximo é inferior a 6%, o que demonstra a validade do modelo.

Tabela 9: Comparação entre nós de temperatura medidos e simulados

Casos	Diferença de temperatura (°C)			Desvio médio (°C)			Erro médio (%)		
	T _{AF}	T _{OC}	T _{MX}	T _{AF}	T _{OC}	T _{MX}	T _{AF}	T _{OC}	T _{MX}
CA0_1_5P	1.4	1.0	0.2	-1.4	-1.0	-1.0	7.7	5.1	0.8
CA1_1_5P	1.2	1.0	0.3	-1.2	1.0	0.0	6.3	5.2	1.3
CA1_2_5P	2.3	0.8	0.4	-2.3	0.8	0.0	11.6	4.1	1.5
CA1_1_1P	1.8	0.1	0.4	-1.8	-0.1	0.0	11.7	0.3	1.9
CA1_2_1P	2.1	0.6	0.0	-2.1	0.6	0.0	12.1	3.2	0.1
UL_1_6P	0.5	0.1	0.4	-0.5	0.1	0.0	2.4	0.5	1.6
UL_2_6P	0.9	0.1	0.1	-0.9	-0.1	0.0	4.1	0.3	0.4
Média	1.4	0.5	0.2	-1.4	0.2	-0.1	8.0	2.7	1.1

A figura seguinte mostra a comparação dos perfis de temperatura medidos e dos simulados.

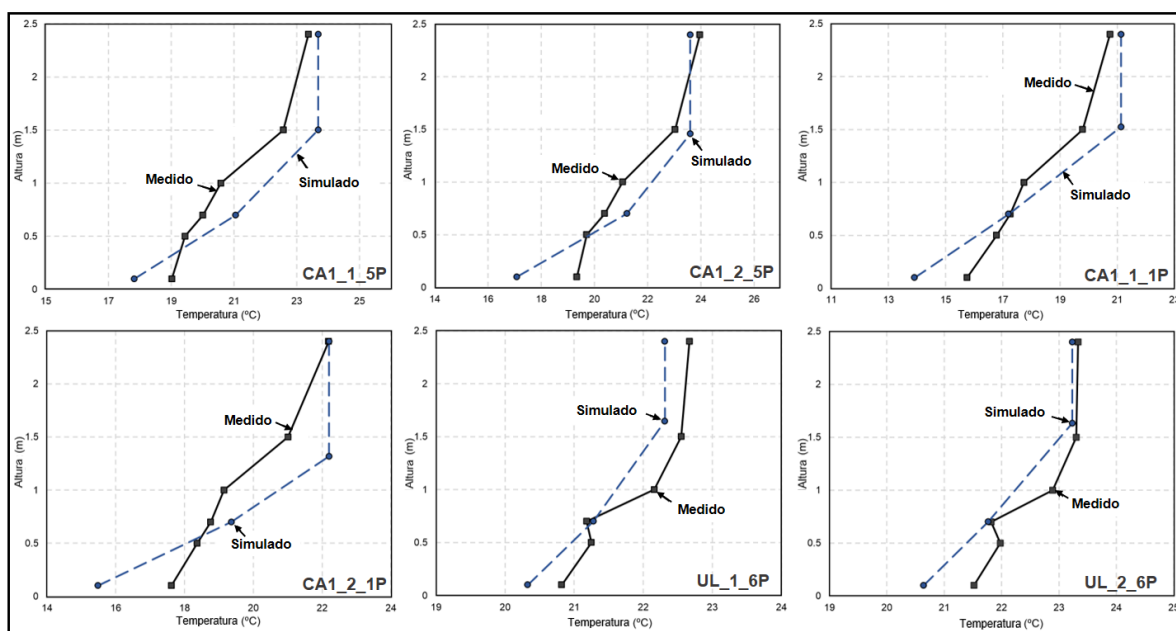


Figura 22: Resultados e comparação da temperatura nos três nós

7.1 Análise do Impacto do Coeficiente de Descarga

Os coeficientes de descarga para o sistema de ventilação natural da creche Areeiro, como foi dito anteriormente, foram obtidos através de simulações CFD. Contudo, estas simulações são difíceis de executar devido à especialização necessária e ao tempo consumido no processo. Nestes casos é comum recorrer a valores tabelados. Esta secção tem como objetivo estudar o impacto da utilização de valores tabelados de coeficientes de descarga na temperatura dos três nós do modelo DV. Para a grelha de admissão foi considerado um c_d de 0.5, obtido especificamente para grelhas [73]. Para a chaminé térmica foi utilizado um valor de 0.52 (específico para chaminés) [74].

Na Tabela 10 está representado o impacto de utilizar valores tabelados e ainda o seu erro associado para cada nó.

Tabela 10: Análise do impacto do coeficiente de descarga no modelo DV de três-nós

Caso\Nó	Erro (%)					
	T_{AF}		T_{OC}		T_{MX}	
	CFD	Tabelado	CFD	Tabelado	CFD	Tabelado
CA0_1_5P	7.7	9.2	5.1	7.2	0.8	1.7
CA1_1_5P	6.3	11.9	5.2	3.1	1.3	5.7
CA1_2_5P	11.6	17.4	4.1	5	1.5	7.8
CA1_1_1P	11.7	19.3	0.3	10.2	1.9	6.6
CA1_2_1P	12.1	18.5	3.2	6.2	0.1	6.7
Erro médio (%)	9.9	15.3	3.6	6.4	1.1	5.7

O impacto de utilizar valores tabelados é notório, dado que o erro associado a cada nó de temperatura aumenta. O nó na zona perto do pavimento, T_{AF} , é o que apresenta, novamente, um erro mais elevado, aumentando de 9.9% para 15.3%. O efeito nos restantes nós é mais baixo, mas notável. Estes resultados indicam que é possível usar valores tabelados de coeficientes de descarga e obter erros médios inferiores a 10%.

Capítulo 8 – Conclusões

Esta dissertação apresenta um conjunto de resultados experimentais que permite validar a ferramenta computacional *EnergyPlus* e avaliar o desempenho de sistemas de ventilação natural DV em três escolas distintas.

O *EnergyPlus* foi utilizado para prever caudais e gradientes de temperatura vertical em três diferentes salas de edifícios educacionais (uma creche e uma universidade) com diferentes sistemas de ventilação natural (com e sem chaminé). Os resultados comparativos das medições efetuadas nas duas salas da creche Areeiro demonstram que o aumento da altura da chaminé, de 1m para 4m, tem um impacto positivo no desempenho do sistema de ventilação natural. Para o cenário de ganhos internos considerados nos ensaios realizados (66W/m^2), uma maior altura de chaminé resulta num aumento do caudal de ar, cerca de 170%, e a temperatura na zona ocupada é reduzida em cerca de 1.2°C . O impacto do parâmetro A^* no desempenho deste sistema DV pode ser verificado pela variação da área de abertura da grelha admissão de ar. Os resultados demonstram que aumentar a área de abertura (de 50% para 100%) conduz a uma diminuição inesperada de caudal e numa redução expectável de temperatura da zona ocupada de acordo com os resultados experimentais. Esta discrepância de resultados poderá dever-se, sobretudo, ao facto de os ensaios terem sido realizados num edifício real onde não existe controlo sobre condições externas, contrariamente ao que acontece em células teste. O desempenho de um sistema de ventilação natural DV também depende do número de plumas térmicas. Para os mesmos ganhos internos, aumentar o número de plumas, de uma para cinco, resulta numa diminuição da temperatura interior em cerca de 0.6°C .

A validação dos resultados revela que o programa de simulação térmica utilizado é capaz de prever o caudal de ventilação natural com um erro médio inferior a 17%, resultando num fator de correlação (r^2) de 0.77. O *software* demonstrou ainda capacidade de estimar a altura neutra com um erro médio inferior a 12%. Para a temperatura vertical também foi obtida uma boa concordância entre os resultados das medições e simulações: um erro médio de 4% em todos os nós, o que corresponde a um desvio médio de 0.7°C . A previsão com o maior desvio ocorre perto do pavimento com um erro de 8%, enquanto os restantes nós têm um erro médio inferior a 3%. Deste modo, o modelo de três-nós utilizado tem a capacidade de determinar o gradiente de temperatura e a altura neutra em sistemas DV. Apesar da complexidade dos casos testados, sistema de ventilação natural sem controlo das condições fronteira, as comparações entre os resultados obtidos e os simulados demonstram a validação da ferramenta computacional *EnergyPlus* em simular sistemas de ventilação natural por deslocamento vertical de ar induzidos pelo efeito térmico.

Os resultados obtidos na creche Telheiras revelam que o sistema de ventilação natural instalado tem a capacidade de manter uma boa qualidade de ar interior e temperaturas dentro da zona de conforto, de acordo com a legislação portuguesa (RECS) e a norma Europeia (EN 15251). Ao examinar os resultados experimentais nesta creche conclui-se que a SA2 está mais fria que a SA1 e que o Corredor em cerca de 0.45°C e 0.61°C respetivamente, indo de encontro com os resultados esperados. Contudo estas medições apresentam algumas limitações, nomeadamente na determinação do número de ocupantes no espaço e no modo como estes utilizam o sistema de ventilação natural.

Dimensionar e projetar sistemas de ventilação natural é uma tarefa complexa, visto que existem diversos fatores que influenciam o seu desempenho. Consequentemente, as ferramentas de simulação térmica apresentam-se como fortes aliadas para complementar esta tarefa.

Perspetiva-se uma revisão e melhoria do balanço de energia e mistura de ar no nó junto ao pavimento (T_{Af}), dado que é onde se verificaram maiores desvios na previsão de temperatura. O trabalho futuro poderá ainda passar pela realização de medições de longo termo em escolas com sistema de ventilação natural DV, permitindo analisar o desempenho do sistema e verificar o cumprimento dos limites de conforto impostos pela legislação em vigor ao longo do ano.

Referências Bibliográficas

- [1] “Buildings European Commission” [Online]. Disponível: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings> [Acedido em: 26-Julho-2016].
- [2] “EIA: How much energy is consumed in residential and commercial buildings in the United States?” [Online]. Disponível: <http://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=86&t=1> [Acedido em: 26-Julho-2016].
- [3] Concetta Marino, Francesco Minichiello, William Bahnfleth, The influence of surface finishes on the energy demand of HVAC systems for existing buildings, *Energy and Buildings*, Volume 95, 15 May 2015, Pages 70-79, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.036>.
- [4] Zheng Yang, Ali Ghahramani, Burcin Becerik-Gerber, Building occupancy diversity and HVAC (heating, ventilation, and air conditioning) system energy efficiency, *Energy*, Volume 109, 15 August 2016, Pages 641-649, ISSN 0360-5442, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.099>.
- [5] Luis Pérez-Lombard, José Ortiz, Christine Pout, A review on buildings energy consumption information, *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 3, 2008, Pages 394-398, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>.
- [6] European Parliament and the Council of the European Union, Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings (recast), 2010.
- [7] Tom Ben-David, Michael S. Waring, Impact of natural versus mechanical ventilation on simulated indoor air quality and energy consumption in offices in fourteen U.S. cities, *Building and Environment*, Volume 104, 1 August 2016, Pages 320-336, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.007>.
- [8] Daisey JM, Angell WJ, Apte MG. Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Indoor Air* 2003;13(1):53-64.
- [9] Landrigan PJ. Environmental hazards for children in USA. *Int J Occup Med Environ Health*. 1998;11(2) 189-194. PMID: 9753898.
- [10] Faustman EM, Silbernagel SM, Fenske RA, Burbacher TM, Ponce RA. Mechanisms underlying Children’s susceptibility to environmental toxicants. *Environmental Health Perspectives*. 2000;108(Suppl 1):13-21.
- [11] Zs. Bakó-Biró, D.J. Clements-Croome, N. Kochhar, H.B. Awbi, M.J. Williams, Ventilation rates in schools and pupils’ performance, *Building and Environment*, Volume 48, February 2012, Pages 215-223, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.018>.
- [12] D. Grimsrud, B. Bridges, R. Schulte, Continuous measurements of air quality parameters in schools, *Building Research and Information* 34 (5) (2006) 447–458.

- [13] M. Mendell, G.A. Heath, Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature, *Indoor Air – International Journal of Indoor Air Quality and Climate* 15 (1) (2005) 27–52.
- [14] Norbäck D, Nordström K. An experimental study on effects of increased ventilation flow on students' perception of indoor environment in computer classrooms. *Indoor Air* 2008;18(4):293-300.
- [15] Salleh NM, Kamaruzzaman SN, Sulaiman R, Mahbob NS. Indoor air quality at school: ventilation rates and its impacts towards children-a review. In: 2nd International conference on environmental science and technology, vol. 6; 2011. pp. 418-22.
- [16] ASHRAE, (2009) *Indoor Air Quality Guide* (ISBN 978-1-933742-59-5).
- [17] Luísa Dias Pereira, Daniela Raimondo, Stefano Paolo Corgnati, Manuel Gameiro da Silva, Assessment of indoor air quality and thermal comfort in Portuguese secondary classrooms: Methodology and results, *Building and Environment*, Volume 81, November 2014, Pages 69-80, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.06.008>.
- [18] Asit Kumar Mishra, Maddali Ramgopal, A comparison of student performance between conditioned and naturally ventilated classrooms, *Building and Environment*, Volume 84, January 2015, Pages 181-188, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.11.008>.
- [19] M. Santamouris, A. Synnefa, M. Assimakopoulos, I. Livada, K. Pavlou, M. Papaglastra, N. Gaitani, D. Kolokotsa, V. Assimakopoulos, Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation, *Energy and Buildings*, Volume 40, Issue 10, 2008, Pages 1833-1843, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.04.002>.
- [20] Eusébio Z.E. Conceição, João M.M. Gomes, Nuno H. Antão, M Manuela J.R. Lúcio, Application of a developed adaptive model in the evaluation of thermal comfort in ventilated kindergarten occupied spaces, *Building and Environment*, Volume 50, April 2012, Pages 190-201, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.10.013>.
- [21] Ricardo Forgiarini Rupp, Natalia Giraldo Vásquez, Roberto Lamberts, A review of human thermal comfort in the built environment, *Energy and Buildings*, Volume 105, 15 October 2015, Pages 178-205, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>.
- [22] Alex Yong Kwang Tan, Nyuk Hien Wong, Natural ventilation performance of classroom with solar chimney system, *Energy and Buildings*, Volume 53, October 2012, Pages 19-27, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.06.010>.
- [23] Nuno M. Mateus, Guilherme Carrilho da Graça, A validated three-node model for displacement ventilation, *Building and Environment*, Volume 84, January 2015, Pages 50-59, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.029>

- [24] Sara Gilani, Hamid Montazeri, Bert Blocken, CFD simulation of stratified indoor environment in displacement ventilation: Validation and sensitivity analysis, *Building and Environment*, Volume 95, January 2016, Pages 299-313, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.010>.
- [25] Zhen Zeng, Xiaofeng Li, Cheng Li, Yingxin Zhu, Modeling ventilation in naturally ventilated double-skin façade with a venetian blind, *Building and Environment*, Volume 57, November 2012, Pages 1-6, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.007>
- [26] Yang Wang, Fu-Yun Zhao, Jens Kuckelkorn, Di Liu, Jun Liu, Jun-Liang Zhang, Classroom energy efficiency and air environment with displacement natural ventilation in a passive public school building, *Energy and Buildings*, Volume 70, February 2014, Pages 258-270, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.071>.
- [27] Ines Khalifa and Leila Gharbi Ernez and Essia Znouda and Chiheb Bouden, Coupling TRNSYS and CONTAM: simulation of a naturally ventilated double-skin façade, *Advances in Building Energy Research*, Volume 9, Issue 2, 2015, Pages 293-304, <http://dx.doi.org/10.1080/17512549.2015.1050694>.
- [28] F.R. Mazarrón, J. Cid-Falceto, I. Cañas, An assessment of using groundthermal inertia as passive thermal technique in the wine industry around the world, *Applied Thermal Engineering* 33–34 (2012) 54–61, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.09.010>.
- [29] Z. Zhai, M. Johnson, M. Krarti, Assessment of natural and hybrid ventilation models in whole-building energy simulations, *Energy and Buildings* 43 (9)(2011) 2251–2261, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.026>.
- [30] Taleghani, M., Tenpierik, M., & van den Dobbelsteen, A. (2014). Indoor thermal comfort in urban courtyard block dwellings in the Netherlands. *Building and Environment*, 82, 566–579. doi:10.1016/j.buildenv.2014.09.028.
- [31] Nuno M. Mateus, Armando Pinto, Guilherme Carrilho da Graça, Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell, *Energy and Buildings*, Volume 75, June 2014, Pages 511-522, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.043>.
- [32] D. Kim, C. Park, Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus, *Energy and Buildings* 43 (12) (2011)3635–3645, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.038>.
- [33] Chris J. Koinakis, Combined thermal and natural ventilation modeling for long-term energy assessment: validation with experimental measurements, *Energy and Buildings*, Volume 37, Issue 4, April 2005, Pages 311-323, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.06.022>.
- [34] E.H. Mathews, D.C. Arndt, Validation of models to predict the thermal and ventilation performance of horse stables, *Building and Environment*, Volume 38, Issue 2, February 2003, Pages 237-246, ISSN 0360-1323, [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(02\)00036-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(02)00036-7).

[35] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7^o ed. John Wiley and Sons, 2011.

[36] Ebrahim Solgi, Rima Fayaz, Behrouz Mohammad Kari, Cooling load reduction in office buildings of hot-arid climate, combining phase change materials and night purge ventilation, Renewable Energy, Volume 85, January 2016, Pages 725-731, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.028>.

[37] Lina Yang, Yuguo Li, Cooling load reduction by using thermal mass and night ventilation, Energy and Buildings, Volume 40, Issue 11, 2008, Pages 2052-2058, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.05.014>.

[38] A.R. Endurthy, Coupling of Thermal Mass with Night Ventilation in Buildings [Thesis], Arizona State University, 2011.

[39] AUTODESK SUSTAINABILITY WORKSHOP: Night-Purge Ventilation [Online]. Disponível: <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/night-purge-ventilation> [Acedido em: 21-Setembro-2016].

[40] Marco Perino, Vincenzo Corrado, Haojie Wang, Qingyan (Yan) Chen, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015 Modeling of the Impact of different Window Types on Single-sided Natural Ventilation, Energy Procedia, Volume 78, 2015, Pages 1549-1555, ISSN 1876-6102, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.201>.

[41] G. Carrilho da Graça, N.C. Daish, P.F. Linden, A two-zone model for natural cross-ventilation, Building and Environment, Volume 89, July 2015, Pages 72-85, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.014>.

[42] Guilherme Carrilho da Graça, Paul Linden, Ten questions about natural ventilation of non-domestic buildings, Building and Environment, Volume 107, October 2016, Pages 263-273, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.007>.

[43] Zhang Lin, Ting Yao, T.T. Chow, K.F. Fong, L.S. Chan, Performance evaluation and design guidelines for stratum ventilation, Building and Environment, Volume 46, Issue 11, November 2011, Pages 2267-2279, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.006>.

[44] Sandberg M, Sjoberg M. A comparative study of the performance of general ventilation systems in evacuating contaminants. Proc Indoor Air 1984;5.

[45] Skaret E. Displacement ventilation. In: Proceedings of international conference on air distribution in rooms. Stockholm, Sweden; 1987.

[46] Linden PF, Lane-Serff GF, Smeed DA. Emptying filling boxes: the fluid mechanics of natural ventilation. J Fluid Mech February 1990;212:309e35. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112090001987>.

- [47] Morton, B.R., Taylor, G.I. & Turner, J.S., Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1956 A 234 (1196), Pages 1-23.
- [48] Risto Kosonen, Natalia Lastovets, Panu Mustakallio, Guilherme Carrilho da Graça, Nuno M. Mateus, Marko Rosenqvist, The effect of typical buoyant flow elements and heat load combinations on room air temperature profile with displacement ventilation, *Building and Environment*, Volume 108, 1 November 2016, Pages 207-219, ISSN 0360-1323, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.037>.
- [49] Skistad, H., Mundt, E., Nielsen, P., Hagstrom, K. & Railio, J., Displacement ventilation in non-industrial premises. *REHVA Guidebook N1*, 2002, Brussels.
- [50] Tareq Gaber Farea, Dilshan Remaz Ossen, Saqaff Alkaff, Hisashi Kotani, CFD modeling for natural ventilation in a lightwell connected to outdoor through horizontal voids, *Energy Build.* 86 (January 2015) 502e513, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.030>. ISSN 0378-7788.
- [51] H. Brohus, P.V. Nielsen. 1994. Contaminant distribution around person in rooms ventilated by displacement ventilation. *Proceedings of 4th International Conference on Air Distribution in Rooms*, Krakow, Poland.
- [52] N. B. Kaye, M. Flynn, M. J. Cook, Y Ji, The role of diffusion on the interface thickness in a ventilated filing box, *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, Volume 652, Pages 195-205. <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112010000881>.
- [53] Huijuan Xing, Hazim B Awbi, Measurement and calculation of the neutral height in a room with displacement ventilation, *Building and Environment*, Volume 37, Issue 10, October 2002, Pages 961-967, ISSN 0360-1323, [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323\(01\)00079-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1323(01)00079-8).
- [54] Linden, P. F. (1999). *The Fluid Mechanics of Natural Ventilation*. *Annual Review of Fluid Mechanics*. Volume 31, 1999, Pages 201–238. <http://dx.doi:10.1146/annurev.fluid.31.1.201>.
- [55] “EnergyPlus™ Documentation Getting Started with EnergyPlus” [Online]. Disponível: https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/GettingStarted.pdf [Acedido em: 20-Junho-2016].
- [56] Nuno Mateus – Validação de modelos de simulação térmica num edifício de dupla pele sem climatização, Lisboa, 2012. Dissertação de Mestrado, Engenharia da Energia e do Ambiente
- [57] CHAM, PHOENICS (2015) [Online]. Disponível: <http://www.cham.co.uk/> [Acedido em: 28-Junho-2016].
- [58] RECS, Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços, Decreto-Lei nº 118/2013 de 20 de Agosto. Diário da República nº159 - Ministério da Economia e do Emprego, Lisboa, 2013.

- [59] Aleksandar S. Anđelković, Igor Mujan, Stojanka Dakić, Experimental validation of a EnergyPlus model: Application of a multi-storey naturally ventilated double skin façade, *Energy and Buildings*, Volume 118, 15 April 2016, Pages 27-36, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.045>.
- [60] V. Shabunko, C.M. Lim, S. Mathew, EnergyPlus models for the benchmarking of residential buildings in Brunei Darussalam, *Energy and Buildings*, Available online 17 March 2016, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.039>.
- [61] A. Persily, Evaluating building IAQ and ventilation with indoor carbon dioxide, *ASHRAE Transactions* 103 (1997) 1–12.
- [62] R. Wallider, D. Norback, G. Wieslander, G. Smedje, C. Erwall, Nasal mucosal swelling in relation to low air exchange rate in schools, *Indoor Air* 7 (1997) 198–205.
- [63] Birgit Krausse, Malcolm Cook, Kevin Lomas, Environmental performance of a naturally ventilated city centre library, *Energy and Buildings*, Volume 39, Issue 7, July 2007, Pages 792-801, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.02.010>.
- [64] Joseph Khedari, Boonlert Boonsri, Jongjit Hirunlabh, Ventilation impact of a solar chimney on indoor temperature fluctuation and air change in a school building, *Energy and Buildings*, Volume 32, Issue 1, June 2000, Pages 89-93, ISSN 0378-7788, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00042-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00042-0).
- [66] CEN. 2007d. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. EN15251 Standard. Brussels: European Committee for Standardization.
- [67] Nuno M. Mateus, Guilherme Carrilho da Graça, Stack driven ventilative cooling for schools in mild climates: analysis of two case studies. 2015. Proceedings of the 36th AIVC-5th TightVent-3rd venticool Conference, 23-24.
- [68] “EnergyPlus: Weather Data” [Online]. Disponível: <https://energyplus.net/weather> [Acedido em: 13-Julho-2016].
- [69] “EnergyPlus™ Documentation Engineering Reference” [Online]. Disponível: https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf [Acedido em: 21-Junho-2016].
- [70] F. Flourentzou, J. Van der Maas, C.-A. Roulet, Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients, *Energy and Buildings*, Volume 27, Issue 3, June 1998, Pages 283-292, ISSN 0378-7788, [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00043-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00043-1).
- [71] M. Perino, “State of the art review Vol.1. State of the art report,” *Integr. Environ. Responsive Elem. Build.*, 2008.

[72] Nuno M. Mateus, Guilherme Carrilho da Graça, Simplified modeling of displacement ventilation systems with chilled ceilings, *Energy and Buildings*, Volume 108, 1 December 2015, Pages 44-54, ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.054>.

[73] J. van der Maas, *Air Flow Through Large Openings in Buildings*. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, LESO-PB (1992). Switzerland, Lausanne.

[74] J. Arce, M.J. Jiménez, J.D. Guzmán, M.R. Heras, G. Alvarez, J. Xamán, Experimental study for natural ventilation on a solar chimney, *Renewable Energy*, Volume 34, Issue 12, December 2009, Pages 2928-2934, ISSN 0960-1481, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.026>.